



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

**Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores**

Estudo empírico do padrão de congestionamento formado num nó de uma
auto-estrada urbana portuguesa

Nº 21774, Pedro Miguel Filipe de Almeida

Orientador
Prof. Doutor Rui Neves da Silva

Monte de Caparica

2009

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar o autor agradece aos seus pais o apoio inestimável que sempre providenciaram para o seu sucesso escolar e o gosto pela aprendizagem e formação contínua que nele despertaram. É com profunda gratidão que reconhece o investimento e o esforço pessoal que sempre envidaram neste sentido.

Agradece igualmente aos amigos próximos pelo tempo de convívio que abdicaram e pelos incentivos que sempre deram para que este projecto fosse levado a bom porto.

Naturalmente, o presente trabalho não seria possível sem o aconselhamento, disponibilidade e orientação do Prof. Rui Neves da Silva, responsável por qualquer mais-valia que o estudo possa vir a ter e a pessoa mais marcante no gosto que o autor desenvolveu pelas temáticas do controlo de sistemas dinâmicos, automação e controlo inteligente, sistemas de apoio à decisão ou sistemas de energia.

Uma palavra de apreço e estima pelos restantes docentes do curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, em particular das secções de Controlo e Electrotecnia/Máquinas Eléctricas, pela forma dedicada como transmitiram o seu conhecimento acerca das matérias leccionadas que serão a base no desenvolvimento futuro das competências do autor neste domínio da Engenharia.

A todos os visados muito obrigado.

SUMÁRIO

O acesso quotidiano de milhares ou mesmo milhões de pessoas oriundas da periferia aos centros urbanos, o transporte à escala global de bens e mercadorias, o turismo massificado ou as crescentes preocupações ecológicas e energéticas são factores que contribuem para um papel cada vez mais relevante dos transportes e, em particular das redes de comunicação.

Estudos que acautelem a evolução sustentável dessas redes, sirvam para otimizar os processos de exploração, incidam sobre o sucesso da sua integração, permitam aumentar a qualidade de serviço oferecida, melhorar os níveis de segurança das vias ou promover uma maior qualidade ambiental são fundamentais e merecem, concerteza, uma atenção crescente por parte das instituições e agentes políticos, organizações não-governamentais (ONG's), fabricantes de automóveis, operadores de transportes, concessionárias, consultoras, empresas de construção civil, entre outras entidades (empresas de metalomecânica, empresas de electrónica, fabricantes e operadores de telecomunicações, etc).

Ora, a presente tese tem como objectivo elementar estudar a complexidade do tráfego rodoviário enquanto sistema complexo e distribuído, partindo de um caso real para identificar, classificar e descrever padrões de congestionamento existentes no trânsito que revelam um comportamento variante no tempo e no espaço.

No quadro da *Three Phase Traffic Theory* preconizada por Boris Kerner o presente trabalho deverá comprovar a aplicabilidade da teoria a situações reais do trânsito, como a partir desta é possível elaborar um modelo capaz de descrever o comportamento do fluxo rodoviário no local de estudo e como a metodologia proposta é adequada à recolha das variáveis descritivas do trânsito e pode ser usada para a constituição do conjunto de dados de validação de um simulador ou utilizados por uma base de conhecimento de um sistema inteligente. As conclusões baseadas em resultados empíricos em auto-estradas exclusivamente germânicas são uma das críticas mais comuns à recente teoria de Kerner.

Com a elaboração de um modelo capaz de representar as dinâmicas espaço-temporais dos padrões de tráfego e a compreensão desses fenómenos talvez venha a ser possível desenvolver no futuro próximas aplicações para utilização nos centros nacionais de tráfego rodoviário.

Por intermédio de uma metodologia que parte da identificação e classificação dos pontos críticos da via (nós que funcionam como perturbações) e dos padrões de congestionamento que ocorrem, o autor descreve esses fenómenos (análise macroscópica quantitativa e qualitativa) e investiga as dinâmicas locais das variáveis fundamentais do tráfego rodoviário (caudal ou fluxo, densidade e velocidade).

O objectivo primário do presente trabalho é assim comprovar a aplicabilidade dos novos conceitos ao estudo do trânsito rodoviário e de como estes são essenciais para a modelação de fenómenos complexos do tráfego. Só captando as estruturas e as suas interacções durante a ocorrência desses fenómenos é possível adoptar estratégias que visem uma gestão mais eficaz do trânsito e que possam inclusivé ser implementadas através de métodos utilizados pelos sistemas actuais.

O passo seguinte aos estudos desta natureza, que parte de uma base empírica para a identificação e modelação de um sistema distribuído complexo, é o desenvolvimento e implementação de soluções de controlo automático de tráfego, aplicações de assistência automática a condutores ou de sistemas para veículos inteligentes.

ABSTRACT

Nowadays millions of people from suburbs came to cities centers by car. Transportation of goods and persons assumes a global scale with an unprecedented pace. Mass market tourism or ever growing ecological and energy concerns have a key role in transportation and communication networks development.

Studies that can provide a more detailed insight about these networks aiming process/chain optimization, their integration (unity), quality of service improvement, security or environment promotion are fundamental and deserve the support of political entities, NGO's, transport operators, organizations (ex: civil, electrical, electronic, consultancy companies or telecommunication operators) and universities.

The basic goal of present work is a qualitative analysis of a real congested traffic pattern formed at a portuguese freeway bottleneck. The study aims to explain when, where, how and why these pattern born, evolve and dissolve and its impact on the traffic flow. From here is possible to have a macroscopic view about spatiotemporal system's evolution.

Knowing the system dynamics and understanding main empirical phenomenons presented on the freeway branch is possible to develop a local model that can be used on the development of an application to monitor, track and forecast traffic flow at this site. Major modelation efforts are already done since publication in recent years of many models, simulators and traffic management applications. This report is based on Three Phase Traffic Theory, a qualitative and empirical approach to the physics of traffic. Boris Kerner develop this theory and gave a mathematical model that describes system main characteristics and behaviour.

Another goal of this thesis is to support/validate simulation results that can be promoted in the future. The study aims to prove that Three Phase Traffic Theory is applicable on technical analisys of portuguese freeway sites, giving traffic authorities the framework for developing strategic policies.

The author pretend to show that his work can be the first step on the development of efficient, effective and specialized technological solutions on the fields of automated traffic control, vehicular remote assistance or intelligent traffic management systems.

PALAVRAS-CHAVE

- Análise de padrões
- Análise empírica
- Controlo rodoviário
- Diagrama fundamental
- Fluxo rodoviário
- Nó rodoviário
- Sistemas complexos
- Sistemas dinâmicos
- Sistemas distribuídos
- Sistemas de tráfego inteligentes
- Tráfego congestionado

KEYWORDS

- Complex systems
- Congested traffic
- Distributed systems
- Dynamic systems
- Empirical analysis
- Fundamental diagram
- Intelligent traffic systems
- Pattern evolution
- Traffic bottleneck
- Traffic control
- Traffic flux
- Traffic jam

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------------------------|---|
| q_{\max}^{free} | Caudal máximo de veículos na via principal durante a fase de fluxo livre. |
| $q_{\text{on},\max}^{\text{free}}$ | Caudal máximo de veículos na rampa de acesso durante a fase de fluxo livre. |
| q^{syn} | Caudal médio de veículos na via principal durante a fase de fluxo sincronizado. |
| $q_{\text{on}}^{\text{syn}}$ | Caudal médio de veículos na rampa de acesso em fluxo sincronizado. |
| q_{FS} | Caudal de veículos no instante temporal em que ocorre a transição de fases F-S. |
| q^{pinch} | Caudal médio de veículos no nó durante o estrangulamento do trânsito. |
| $q_{\text{lim}}^{\text{pinch}}$ | Valor de saturação do caudal de veículos no nó com o trânsito comprimido. |
| $q_{\text{out}}^{\text{B}}$ | Caudal de descarga no nó. |
| q_{sum} | Caudal total de veículos no troço a jusante do nó. |
| q_{in} | Caudal total de veículos no troço a montante da estrutura de congestionamento. |
| q_{on} | Caudal total na rampa de acesso. |
| δq | Perda de capacidade da via. |
| v_{\max}^{free} | Velocidade máxima durante a fase de fluxo livre na via principal. |
| $v_{\text{on},\max}^{\text{free}}$ | Velocidade máxima durante a fase de fluxo livre na rampa de acesso. |
| v_{\min}^{syn} | Velocidade média durante a fase de fluxo sincronizado na via principal. |
| $v_{\text{on},\min}^{\text{syn}}$ | Velocidade média durante a fase de fluxo sincronizado na rampa de acesso. |
| v_{up} | Velocidade de propagação da cauda de onda do congestionamento. |
| v_{down} | Velocidade de propagação da frente de onda do congestionamento. |
| v_g | Velocidade de propagação de uma Fila Móvel Longa (WMJ). |
| L_{syn} | Comprimento médio da estrutura de congestionamento. |
| D | Distância de sincronismo. |
| g | Distância entre veículos consecutivos. |
| ρ^{syn} | Densidade média de veículos na via durante a fase de fluxo sincronizado. |
| ρ_{\max} | Densidade máxima de veículos durante a fase de bloqueio. |
| ρ_{\min} | Densidade mínima de veículos durante a fase de fluxo livre. |

LIST OF SYMBOLS

| | |
|------------------------------------|---|
| q_{\max}^{free} | Maximum flow rate at free flow phase at main road. |
| $q_{\text{on},\max}^{\text{free}}$ | Maximum flow rate at free flow at on-ramp. |
| q^{syn} | Mean flow rate at synchronized flow at main road. |
| $q_{\text{on}}^{\text{syn}}$ | Mean flow rate at synchronized flow at on-ramp. |
| q_{FS} | Pre-discharge flow rate. |
| q^{pinch} | Mean flow rate in pinch region. |
| $q_{\text{lim}}^{\text{pinch}}$ | Limit flow rate in pinch region. |
| $q_{\text{out}}^{\text{B}}$ | Discharge flow rate at bottleneck. |
| q_{sum} | Total flow rate in main road downstream of bottleneck. |
| q_{in} | Traffic demand. |
| q_{on} | Total flow rate at on-ramp. |
| δq | Capacity drop. |
| v_{\max}^{free} | Maximum velocity in main road during free flow. |
| $v_{\text{on},\max}^{\text{free}}$ | Maximum velocity at on-ramp during free flow. |
| v_{\min}^{syn} | Mean velocity in main road during synchronized flow. |
| $v_{\text{on},\min}^{\text{syn}}$ | Mean velocity at on-ramp during synchronized flow. |
| v_{up} | Upstream front velocity of congested pattern. |
| v_{down} | Downstream front velocity of congested pattern. |
| v_{g} | Downstream front velocity of wide moving jam. |
| L_{syn} | Average length of congested pattern. |
| D | Synchronization distance. |
| g | Distance between consecutive vehicles. |
| ρ^{syn} | Average density of vehicles in congested pattern. |
| ρ_{\max} | Maximum density of vehicles during wide moving jam phase. |
| ρ_{\min} | Minimum density of vehicles during free flow. |

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|-----|--|
| CP | Padrão de congestionamento |
| SP | Padrão de congestionamento sincronizado |
| WSP | Padrão alargado de congestionamento sincronizado |
| MSP | Padrão móvel de congestionamento sincronizado |
| LSP | Padrão localizado de congestionamento sincronizado |
| WMJ | Fila móvel longa |
| NMJ | Fila móvel curta |
| GP | Padrão geral de congestionamento |
| 3F | Teoria das 3 fases |

LIST OF ACRONYMS

| | |
|-----|--------------------------------|
| CP | Congested pattern |
| SP | Synchronized pattern |
| WSP | Wide synchroniszed pattern |
| MSP | Moving synchronized pattern |
| LSP | Localized synchronized pattern |
| WMJ | Wide moving jam |
| NMJ | Narrow moving jam |
| GP | General pattern |
| 3F | Three phase traffic theory |

ÍNDICE DE MATÉRIAS

| | |
|---|------|
| AGRADECIMENTOS..... | ii |
| SUMÁRIO | iii |
| ABSTRACT..... | v |
| PALAVRAS-CHAVE..... | vi |
| KEYWORDS | vii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | viii |
| LIST OF SYMBOLS | ix |
| LISTA DE ACRÓNIMOS | x |
| LIST OF ACRONYMS..... | xi |
| ÍNDICE DE MATÉRIAS | xii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiv |
| ÍNDICE DE QUADROS..... | xvii |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Congestionamento e tipos de padrões..... | 3 |
| 1.2. Transições | 12 |
| 1.3. Fila Móvel Longa (WMJ) | 19 |
| 1.4. Formação das filas móveis..... | 22 |
| 1.5. Transformação e evolução dos padrões | 31 |
| 1.6. Características da via na formação de congestionamento..... | 35 |
| 1.6.1. Nós adjacentes e padrões de Congestionamento Expandido | 36 |
| 1.6.2. Nós desbloqueantes | 36 |
| 1.7. Diagrama Fundamental Empírico | 37 |

| | | |
|-------------------|------------------------------------|----|
| 2.1. | Especificação e pressupostos | 42 |
| 2.2. | Metodologia | 47 |
| 2.3. | Resultados | 49 |
| 2.3.1. | 28 de Maio de 2007 | 49 |
| 2.3.2. | 29 de Maio de 2007 | 60 |
| 2.3.3. | 30 de Maio de 2007 | 65 |
| 2.3.4. | 31 de Maio de 2007 | 69 |
| 2.3.5. | 1 de Junho de 2007 | 74 |
| 2.4. | Resumo da análise empírica..... | 80 |
| GLOSSÁRIO | | 88 |
| BIBLIOGRAFIA..... | | 93 |
| ANEXOS..... | | 97 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1- Exemplo do Diagrama Fundamental Empirico do trânsito que relaciona as grandezas densidade, caudal e velocidade | 5 |
| Figura 1.2- Exemplo de um diagrama espaço-temporal (Kerner, 2004) | 6 |
| Figura 1.3- Exemplo de um nó rodoviário onde se intersectam duas vias (Kerner, 2004) | 8 |
| Figura 1.4 - Exemplo da propagação de um padrão WSP (Kerner, 2004)..... | 10 |
| Figura 1.5 - GP do tipo 1 e do tipo 2 | 11 |
| Figura 1.6 - Probabilidade da transição de fases (Kerner, 2004) | 16 |
| Figura 1.7 - Diagrama Fundamental. Curva F associada à fase de Fluxo Livre e a “linha J” associada à fase de Fila Móvel Longa | 22 |
| Figura 1.8 - Exemplo de transições de fase do trânsito típicas em congestionamentos do tipo GP | 24 |
| Figura 1.9 - Exemplo de congestionamento forte e fraco extraído (Kerner, 2004)..... | 29 |
| Figura 1.10 - Diagrama com os vários padrões de congestionamento em função dos fluxos na via principal e na via de acesso (Kerner, 2004) | 32 |
| Figura 1.11 - Perda da capacidade da via que é dada pela diferença entre os limites do caudal médio do trânsito no nó antes e após o congestionamento | 35 |
| Figura 1.12 - Características típicas do Diagrama Fundamental Empírico, em forma de U-invertido, V-Invertido e Lambda-Inverso..... | 38 |
| Figura 2.1 – Localização espacial dos detectores virtuais utilizados para realizar as medições da velocidade e caudal em cada uma das faixas de rodagem. Canto superior esquerdo refere-se ao detector D2, inferior detectores D3 (esquerda) e D1 (direita). No canto superior direito surge o detector D_{on-up} | 43 |
| Figura 2.2 – Comparativo entre os caudais de saída e de entrada na via..... | 50 |
| Figura 2.3 – Evolução temporal da velocidade e fluxo | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.4 – Diferença de velocidades com a via desbloqueada e congestionada | 53 |
| Figura 2.5 – Diferença de velocidades entre veículos consecutivos que circulam na mesma faixa de rodagem. Faixas esquerda a traço contínuo e central a tracejado..... | 54 |
| Figura 2.6 – Diferença de velocidade entre pelotões consecutivos de veículos para ambas as faixas de rodagem durante a fase de fluxo livre e congestionado..... | 55 |
| Figura 2.7 – Distribuição dos veículos pelas faixas esquerda e central durante os períodos em que a estrada se encontra livre e bloqueada | 55 |
| Figura 2.8 – Distribuição das velocidades em função da distância média entre veículos na situação de via livre (triângulos) e de via congestionada (círculos). O diagrama tem por base os dados relativos à faixa esquerda..... | 56 |
| Figura 2.9 – Frequências absolutas para cada classe de velocidade praticada em cada uma das faixas de rodagem | 57 |
| Figura 2.10 – Evolução temporal da velocidade e caudal na rampa de acesso da A9 para a A5, sentido Lisboa-Cascais. Situação no ponto de convergência e no troço imediatamente a montante | 58 |
| Figura 2.11 – Diagrama fundamental empírico para a faixa esquerda da via. Característica em forma de λ inverso | 60 |
| Figura 2.12 – Comparação entre os caudais q_{in} (fluxo total a montante do nó na A5) e q_{on} (fluxo na rampa de acesso que dá conta dos veículos que pretendem entrar na A5)..... | 61 |
| Figura 2.13 – Evolução temporal da velocidade e fluxo | 62 |
| Figura 2.14 – Caudais na rampa de acesso junto ao nó (D_{on}) e a montante deste (D_{on-up}) | 63 |
| Figura 2.15 – Dinâmica do trânsito durante o congestionamento. As setas mostram o aparecimento das ondas de bloqueio móveis na zona de compressão do trânsito (intersecção das vias no detector D_{on}) e como a estrutura evolui em plena A9 | 64 |
| Figura 2.16 – Diagrama Fundamental Empírico para o detector situado no nó..... | 65 |
| Figura 2.17 – Evolução temporal da velocidade e fluxo | 67 |
| Figura 2.18 – Evolução temporal da velocidade e fluxo na rampa de acesso..... | 68 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.19 – Evolução temporal da velocidade e caudal..... | 70 |
| Figura 2.20 – Diagrama Fundamental Empírico para a faixa esquerda no detector situado na intersecção e gráfico da relação entre a densidade e a velocidade..... | 71 |
| Figura 2.21 – Relação entre o caudal de descarga (q_{out}) e a procura por parte dos condutores (q_{sum}) | 72 |
| Figura 2.22 – Comportamento do fluxo e da velocidade em função da densidade de veículos na A5, na rampa de acesso junto ao nó da rede | 72 |
| Figura 2.23 – Desvio entre a velocidade de circulação nas faixas esquerda e central da A5 | 73 |
| Figura 2.24 – Comportamento do trânsito rodoviário em termos de velocidade e caudal..... | 75 |
| Figura 2.25 - Relação entre as velocidades praticadas na intersecção entre a A5 e a A9..... | 76 |
| Figura 2.26 – Percentagem de veículos na faixa de rodagem mais à esquerda na via principal | 76 |
| Figura 2.27 – Relação entre a velocidade medida e a distância média entre veículos consecutivos..... | 77 |
| Figura 2.28 – Diagrama fundamental empírico | 77 |
| Figura 2.29 – Evolução da velocidade em função da densidade de veículos presentes na via de acesso... | 78 |
| Figura 2.30 – Evolução temporal da velocidade e fluxo na A9 | 79 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1– Detectores instalados nas vias para realização das medidas | 43 |
| Tabela 2.2 – Resumo de vários erros que afectam o processamento e análise dos dados | 45 |
| Tabela 2.3 – Tempos associados à disrupção da velocidade de circulação na A5. t_{FS} e t_{SF} são a duração para se formar ou dissolver o congestionamento | 52 |
| Tabela 2.4– Resumo dos caudais e velocidade na A5 antes, durante e após o congestionamento do nó rodoviário..... | 52 |
| Tabela 2.5 – Instantes associados ao início e fim do congestionamento e tempo médio da transição de fases do sistema..... | 59 |
| Tabela 2.6 – Valores característicos da velocidade e fluxo na rampa de acesso a 28/05/2007..... | 59 |
| Tabela 2.7 –Caudal e densidade na A9 a montante da intersecção. Período do estrangulamento rodoviário e tempo médio de duração. | 59 |
| Tabela 2.8 – Tempos da formação e dissipação do congestionamento na A5. Durações médias da transição de fases do sistema | 62 |
| Tabela 2.9 – Velocidades observadas na A5 e A9 em troços contíguos ao nó a 29/06/2007 | 65 |
| Tabela 2.10 – Caudais máximo, mínimo e compressão (A5 e A9), entre as 7h15 e as 08h45 de 29/06/2007 | 65 |
| Tabela 2.11 – Tempos associados à transição de fases do sistema no nó e a montante deste. Durações médias das transições | 68 |
| Tabela 2.12 – Valores do fluxo na A5 e A9 durante o dia 31 de Maio de 2007 | 73 |
| Tabela 2.13 – Principais valores da velocidade (km/h) na A5 e A9 no dia 31 de Maio de 2007 durante o intervalo de observação | 74 |
| Tabela 2.14 – Resumo dos tempos de transição de fluxo livre para sincronizado e o inverso no nó da A5. | |

| | |
|---|----|
| Duração média das transições | 74 |
| Tabela 2.15 – Resumo dos principais valores de caudal na A5 e A9 a 01/06/2007 | 79 |
| Tabela 2.16 – Valores mais relevantes da velocidade com e sem congestionamento a 01/06/2007 | 80 |
| Tabela 2.17 – Síntese dos principais resultados quantitativos do estudo..... | 83 |

INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje os transportes representam uma dimensão fundamental na vida das pessoas, quer se trate da mobilidade suburbana, intercidades, entre países ou intercontinental. A globalização das economias, a massificação do automóvel ou do avião e o crescimento do turismo são alguns exemplos da necessidade de redes de transportes cada vez maiores, mais flexíveis e modulares. O crescimento das vias de comunicação é um requisito, assim como uma utilização mais racional das já existentes. As vias rodoviárias são o principal canal de circulação de pessoas e a sua optimização é imperiosa por forma a se garantir melhor qualidade de serviço (ex: menores tempos de deslocação e frequência de paragens), maior segurança (ex: menor número de acidentes e da sua gravidade) ou redução do impacto ambiental (ex: menos emissões de gases tóxicos ou a redução do ruído).

Em Portugal tem-se assistido nas últimas décadas a um forte crescimento da rede de auto-estradas, a qual cobre hoje em dia o território nacional e constitui o principal meio de interligação à Europa. A auto-estrada é utilizada não só como via preferencial para a realização de médias e longas-distâncias, como se tornou a eleita para o acesso diário às cidades. A maioria da população utiliza as auto-estradas para as deslocações trabalho-casa ou para fins de lazer (acesso a centros comerciais, praias, complexos desportivos, centros culturais, etc).

Encarando o trânsito rodoviário como um sistema de partículas é possível analisá-lo do ponto de vista físico, aplicando as teorias da mecânica clássica e da termodinâmica para o seu entendimento. Nas últimas décadas desenvolveram-se várias abordagens microscópicas para explicar as dinâmicas internas do tráfego, sustentadas, por exemplo, na relação veículo-condutor ou na interacção entre veículos [2].

A compreensão destes fenómenos levou ao desenvolvimento de sistemas inteligentes aplicados no planeamento e gestão das redes de transportes, na produção de “veículos inteligentes” ou no controlo e exploração das vias de comunicação.

Porém, constata-se que estes modelos são limitados na representação de certos fenómenos observados no trânsito. O tráfego rodoviário deve ser encarado como um sistema complexo, não-linear e distribuído que revela um comportamento variante no tempo e no espaço.

As mais recentes investigações nesta área estão relacionadas com a física não-linear e

estatística e com um domínio apelidado de sinérgica [32] que se aplica a sistemas cujo conhecimento não pode ser previsto pelo comportamento individual dos seus componentes. No fundo, o que se pretende é analisar os fenómenos espaço-temporais do trânsito e perceber como é que o comportamento colectivo dos condutores pode levar à auto-organização do tráfego (*self-organization*) e à formação de padrões. Estas estruturas só podem ser completamente identificadas e classificadas na conjugação da abordagem microscópica (para modelação de comportamentos locais) com uma análise macroscópica mais robusta, isto é, numa teoria que explique e preveja esses fenómenos empíricos espaço-temporais. Até recentemente os estudos macroscópicos eram realizados pressupondo que o sistema se encontrava em regime estacionário (o sistema é composto exclusivamente por estados estáveis). Hoje, pretende-se englobar as dinâmicas complexas evidenciadas na observação do trânsito, nomeadamente efeitos de nucleação, histerese ou dissipação onde há a existência de estados instáveis [29], [21].

Ver o tráfego rodoviário como um sistema físico onde se dão várias transições de fases provocadas por fenómenos complexos e não-lineares que ocorrem em diferentes pontos do espaço e do tempo é o fio condutor das investigações que hoje em dia são levadas a cabo nesta área. A explicação dos factos empíricos através de um modelo qualitativo e matemático tem sido o principal desafio para os cientistas do trânsito automóvel. A teoria das 3 Fases (3F), preconizada pelo russo Boris Kerner [1], é uma possível ferramenta de trabalho para o desenvolvimento de aplicações que visem o aumento da segurança na estrada ou eficiência de utilização da via.

Com a teoria 3F abriu-se caminho à criação de modelos que podem ser utilizados para detecção, acompanhamento e previsão dos padrões de congestionamento do trânsito, melhorando a qualidade de serviço oferecida aos condutores, facilitando a exploração e manutenção da via, reforçando a sua fiabilidade e atenuando os efeitos negativos da poluição atmosférica causada pelos veículos. Um modelo empírico fiel ao comportamento revelado pelo trânsito é a base para suprimir situações de congestionamento, quer seja através de mecanismos de controlo inteligente, quer seja através das novas tecnologias de comunicação que permitam apoiar o processo de decisão dos condutores (mais e melhor informação permite condicionar o seu comportamento levando a estratégias de cooperação em vez de estratégias competitivas que se têm verificado úteis para derimir congestionamentos).

1. TEORIA DAS 3 FASES

1.1. Congestionamento e tipos de padrões

A teoria das 3 Fases (*Three Phase Traffic Theory*), adiante designada por teoria 3F, é uma recente abordagem desenvolvida pelo físico russo Boris Kerner para aproximar os fenómenos observados no tráfego rodoviário a uma fundamentação teórica mais ampla e robusta do que as formulações até à data desenvolvidas.

Kerner, investigador da Daimler-Crysler, analisa os dados experimentais recolhidos nas auto-estradas alemãs de forma a encontrar padrões no trânsito que se formam no espaço e no tempo e que permitem explicar o comportamento estacionário e dinâmico do sistema. A teoria por ele desenvolvida, que permite identificar e classificar os vários tipos de estruturas e assim facultar uma explicação para o comportamento evidenciado pelo tráfego rodoviário, é confrontada com os fenómenos empíricos observados.

O presente trabalho pretende verificar a validade da teoria 3F para um troço de uma auto-estrada portuguesa. Se os resultados do estudo validarem a teoria então é possível que esta possa vir a ser aplicada em Portugal através da sua integração nos sistemas e tecnologias já existentes ou que venham a ser implementados de raiz com o intuito e benefícios já explicitados.

Mas para que tal possa vir a ser concretizado é necessário, em primeiro lugar, apresentar os conceitos fundamentais subjacentes à teoria 3F e, numa segunda fase, verificar se essa formulação é adequada e suficiente para representar os fenómenos locais do trânsito.

Começamos então pela explicação teórica. A teoria 3F baseia-se na premissa de que o trânsito é um sistema constituído por três fases distintas: a fase de Fluxo Livre ou *Free Flow* (F), a fase de Fluxo Sincronizado ou *Synchronized Flow* (S) e a fase de Fila Móvel Longa ou *Wide Moving Jam* (J). A existência de duas fases (S e J) durante a situação de congestionamento é uma das novidades veiculadas por esta teoria no momento da sua divulgação.

A fase F é caracterizada por uma situação em que o trânsito flui desafogadamente sem qualquer tipo de restrições para os condutores, excepto as condições intrínsecas da via, dos veículos ou climatéricas. Estes constrangimentos são considerados os principais parâmetros de

controlo do sistema, enquanto as variáveis de tráfego assumidas no estudo são a velocidade média, o caudal e a densidade, grandezas macroscópicas comumente adoptadas nos modelos clássicos de análise do trânsito.

Na situação de Fluxo Livre os condutores circulam à velocidade desejada ou de referência, que de um modo geral se pode assumir como sendo a velocidade máxima teórica permitida na via v_{\max}^{free} . É nesta fase que se encontra o caudal e densidade mínimos do trânsito, respectivamente, q_{\min}^{free} e $\rho_{\min}^{\text{free}}$. Enquanto o sistema se encontra nestas condições, as duas variáveis relacionam-se de forma linear entre si, crescendo gradualmente até atingirem um valor crítico. A recta que formam pode ser visualizada no plano $q(\rho)$, denominado Diagrama Fundamental, o qual está na base da maioria dos estudos do tráfego rodoviário e permite a visualização dos estados pelos quais o trânsito passa.

A teoria 3F socorre-se igualmente da relação entre estas duas grandezas fundamentais do trânsito para explicar os fenómenos espaço-temporais dos congestionamentos e as transições que ocorrem no tráfego. Contudo, ao contrário dos trabalhos anteriores, não aceita a hipótese de que a característica do plano continua a ser linear nos estados associados ao congestionamento. Ao invés, preconiza a existência de perturbações no sistema que conduzem a dinâmicas no fluxo rodoviário. Se o modelo LWR (*Lighthill-Whitham-Richard Model*) ou as *Queuing Theories* assentam no princípio que nos estados de congestionamento os veículos circulam uniformemente na via (à mesma velocidade e mantendo as mesmas distâncias), a teoria 3F baseia-se na hipótese de que durante o congestionamento os veículos podem circular à mesma velocidade para diferentes densidades de trânsito ou vice-versa em função de uma distância que os condutores consideram como referência. É por isso que Kerner acredita na existência de uma região 2D no plano $q(\rho)$ associada aos estados de congestionamento e o apela de Diagrama Fundamental Empírico. O factor distintivo é a dispersão destes estados no plano em vez da existência de uma recta, condição necessária para poder explicar vários fenómenos observados no trânsito e que as escolas ligadas ao diagrama teórico original o não conseguem fazer. Um breve resumo sobre as principais diferenças entre os vários quadros conceptuais é realizado em [17].

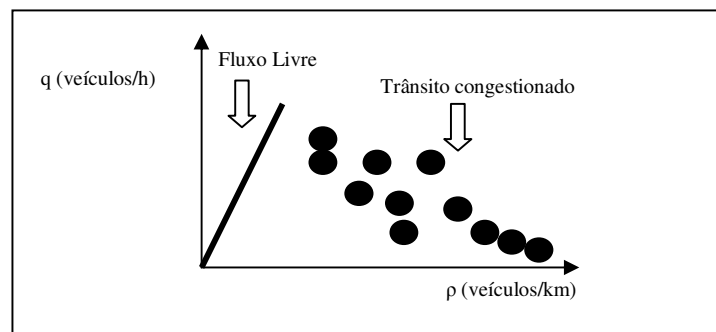


Figura 1.1- Exemplo do Diagrama Fundamental Empírico do trânsito que relaciona as grandezas densidade, caudal e velocidade

Segundo a teoria 3F o trânsito é um sistema complexo, composto por estados estáveis e meta-estáveis. É um sistema distribuído cujo comportamento evolui tanto no tempo como no espaço. Qualquer modelização do sistema implica o conhecimento das propriedades associadas às transições de fases e das características das estruturas espaço-temporais que se formam durante os congestionamentos.

Somente através de uma análise conjugada das transições que o trânsito atravessa e dos padrões que nele se criam é possível caracterizá-lo adequadamente. E como existem transições e estruturas espaço-temporais diferentes durante o congestionamento, a teoria 3F divide a fase de Congestionamento [19] do Diagrama Fundamental em duas fases distintas: a fase de Fluxo Sincronizado (S) e a Fase da Fila Móvel Longa (J). O sistema é analisado à luz de outros sistemas biológicos, revelando igualmente muitos dos fenómenos não-lineares associados a estes, como por exemplo, os efeitos de disrupção, saturação, histerese, dispersão, estrangulamento (*pinch effect*), sincronismo ou meta-estabilidade [22], [33]. Todos estes efeitos serão descritos ao longo do trabalho e surgem na análise das três fases, principalmente ligados às transições entre elas.

Aliás, a identificação de cada uma das fases (representada por um conjunto de estados) é feita fundamentalmente através da compreensão dos fenómenos responsáveis pelas transições ocorridas no sistema. Os padrões, estruturas uniformes com características específicas, formam-se e evoluem em cada uma das fases a partir dessas transições.

Na teoria 3F podem ocorrer as seguintes transições:

- Transição F-S: o tráfego passa da situação de Fluxo Livre para a situação de Fluxo Sincronizado;
- Transição S-F: situação inversa à anterior;
- Transição S-J: o tráfego passa do cenário de Fluxo Sincronizado para a situação de Fila Móvel Longa;
- Transição J-S: a Fila Móvel Longa vai sendo suprimida dando posteriormente lugar à situação em que o trânsito se encontra na fase S;
- Transição F-S-J: cascata ou sequência em que o trânsito passa pelas três fases possíveis do sistema, desde a situação da via desimpedida até à fase em que uma onda alargada de congestionamento se propaga na estrada (bloqueio da via).

Qualquer uma destas transições será explicada mais à frente no relatório, sendo de notar que a teoria adoptada não admite a existência de uma transição F-J, isto é, uma situação em que o tráfego passe instantaneamente da fase de Fluxo Livre para a constituição de uma Fila Móvel Longa, ao contrário do que advogam algumas das abordagens baseadas no Diagrama Fundamental em que o trânsito passa do cenário de Fluxo Livre para a situação de Congestionamento.

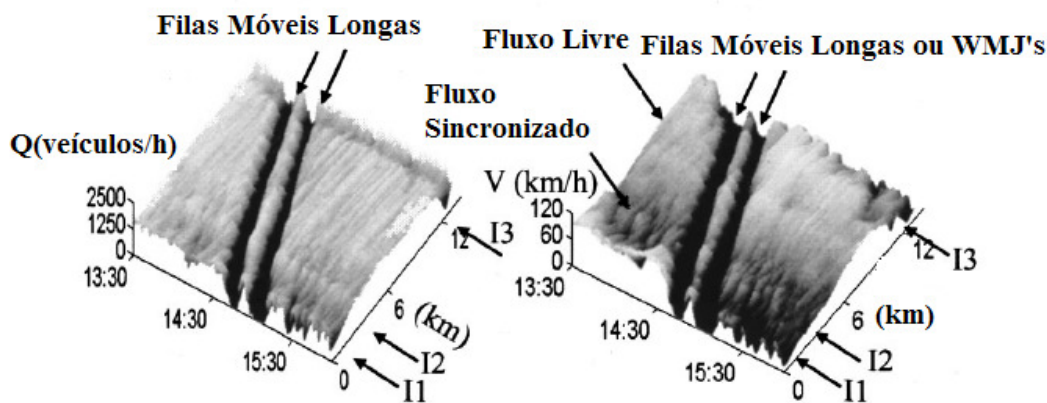


Figura 1.2- Exemplo de um diagrama espaço-temporal (Kerner, 2004)

Comece-se por analisar os vários padrões de congestionamento possíveis na fase de Fluxo Sincronizado. Assumindo a existência de um nó na rodovia, que para o caso em estudo se trata

da existência de uma via de acesso à auto-estrada, é exequível a formação de vários tipos de estruturas de congestionamento, as quais se podem constituir no local preciso onde se encontra o nó ou podem ter origem na sua vizinhança. Assim, convém distinguir a localização geográfica do nó da localização efectiva do congestionamento, esta última podendo ser um ponto a montante ou a jusante da vizinhança do nó.

Releva que nem todos os nós são nós de congestionamento (*effectual bottlenecks*). Um nó só pode ser assim considerado caso haja uma transição de fases no trânsito, dando origem a um padrão de congestionamento (*Congested Pattern* ou CP). Em cada CP podem coexistir várias fases, por exemplo a fase S e J (típico em padrões do tipo *General Pattern* ou GP). A análise empírica levada a cabo tem também como objectivo aferir se a intersecção se trata de um nó determinístico, ou seja, se a formação de um CP é observada recorrentemente nas várias realizações/observações.

Para efeitos de simplificação da análise e visto que numa via podem existir nós de congestionamento muito próximos uns dos outros, pode-se assumir a existência de um meta-nó em que cada variável de tráfego é definida em função dos valores singulares de cada um dos nós. Onde,

$$q_{meta,on} = q_{1,on} + q_{2,on} + \dots + q_{n,on} - q_{1,off} - q_{2,off} - \dots - q_{m,off} \quad (1.1)$$

onde $q_{1,on}$, $q_{2,on}$ $q_{n,on}$ são os fluxos das vias de acesso e $q_{1,off}$, $q_{2,off}$... $q_{m,off}$ seriam os fluxos associados às vias de saída. Naturalmente, $q_{meta,on}$ é o fluxo do meta-nó.

Ora, um nó de congestionamento efectivo é um ponto de intersecção entre duas ou mais vias e está ligado ao fenómeno de disrupção ou *breakdown phenomenon*. A disrupção no trânsito acontece devido a uma perturbação no nó e é identificada pela queda abrupta da velocidade dos veículos. O decaimento da velocidade e consequente aumento da densidade do tráfego rodoviário está, portanto, intimamente relacionado com uma transição da fase F para a fase S, podendo esta ocorrer na região de união de vias (via de acesso e via principal) ou na vizinhança da zona onde os veículos fazem as necessárias trocas de faixa de rodagem para atingir uma determinada via de saída.

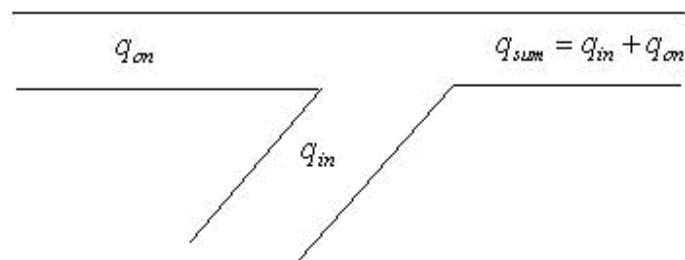


Figura 1.3- Exemplo de um nó rodoviário onde se intersectam duas vias (Kerner, 2004)

Se como se disse, na fase F a via se encontra desobstruída podendo os veículos circularem à velocidade máxima e sendo possível existirem fluxos de tráfego elevados e ocupação mínima das faixas de rodagem, o mesmo não acontece na situação de congestionamento associada às fases S e J.

Durante um congestionamento o trânsito apresenta um comportamento com propriedades específicas para uma determinada zona espacial e num determinado intervalo de tempo. Uma análise qualitativa do tráfego rodoviário permite identificar a formação e evolução de padrões ou estruturas na via, os quais apresentam valores característicos distintos e dinâmicas próprias. De acordo com a teoria 3F é possível classificar um padrão de congestionamento CP nos seguintes sub-tipos:

- i. Synchronized Pattern ou SP;
- ii. General Pattern ou GP.

Estes apresentam ainda classes derivadas. Em (i) é possível classificar o SP em:

- *Wide Synchronized Pattern* ou WSP: O congestionamento forma uma onda que se propaga para montante do local da via onde teve origem. A frente de onda dianteira, ou seja, a zona de transição ou fronteira entre as duas fases, neste particular entre a fase F e S, está fixa no nó e a velocidade de propagação da onda para montante dá-se a um valor constante. Este padrão difere da onda da fase J (Fila Móvel Longa) essencialmente por manter a frente de onda fixa, mas também porque apresenta geralmente uma queda ligeira no valor do fluxo rodoviário face à fase F (na fase J onde existe WMJ a queda do caudal é acentuada relativamente a F). Já o fenómeno de disrupção implica que a queda de velocidade seja acentuada (depressão), algo que pode ser igualmente observado nos restantes padrões de

congestionamento. Há ainda um aspecto peculiar numa estrutura WSP que se prende com a existência do efeito de sincronização dos caudais nas diferentes faixas de rodagem.

- *Local Synchronized Pattern* ou LSP: Padrão limitado a montante e a jusante pela fase de Fluxo Livre. Uma vez estabelecido não há propagação da frente ou cauda da onda de congestionamento existente na via. Como o nome indica é uma estrutura espacialmente delimitada onde não se vislumbra qualquer Fila Móvel Longa, mas tal como num WSP verifica-se o efeito de sincronização de fluxos entre as diversas faixas de rodagem (muitas vezes de fraca intensidade como em WSP). Todavia, pode haver variação do comprimento da onda L_{syn} pode conforme as condições de tráfego no dia da observação.
- *Moving Synchronized Pattern* ou MSP: Ocorre mais facilmente em vias de saída do que em rampas de acesso à via principal. Nestas circunstância, o seu estabelecimento deve-se ao aumento abrupto do número de veículos que transitam das faixas mais à esquerda para a faixa de saída que se encontra à direita. Conforme os padrões anteriores, a onda que se propaga a montante na via principal tem um caudal médio no seu interior similar ao caudal da fase F, fase que se volta a instalar no nó de congestionamento após o desaparecimento da MSP. Esta estrutura difere das duas anteriores devido à frente dianteira da onda não se manter fixa. Contrariamente a uma WMJ, a velocidade de propagação dessa frente não é um parâmetro característico e varia ao longo da via e do tempo. Além disso, observa-se geralmente o “efeito de captura” (*catch effect*) num MSP, ou seja, esta padrão não tem a capacidade de se propagar indefinidamente por vários nós da via que se encontrem a montante. Ao invés, a Fila Móvel Longa tem essa propriedade.

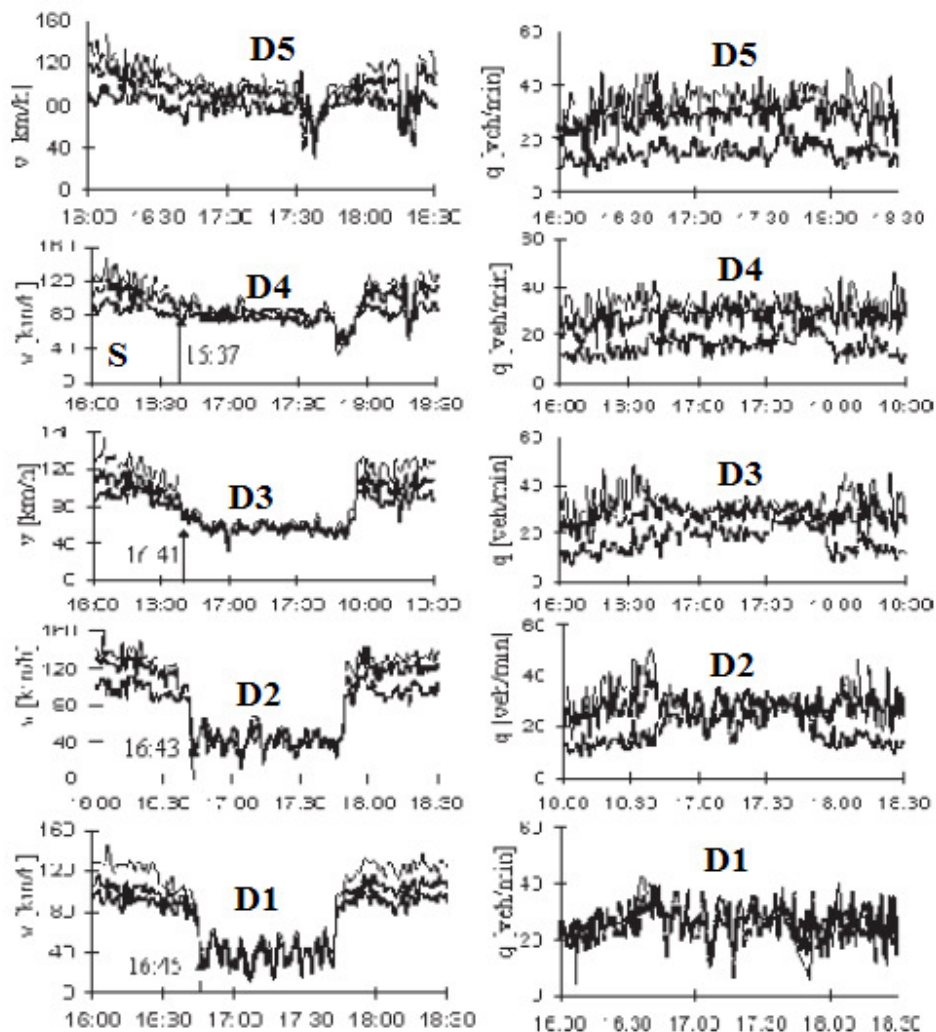


Figura 1.4 - Exemplo da propagação de um padrão WSP (Kerner, 2004)

Relativamente aos padrões generalistas GP é possível fazer a seguinte sub-classificação:

- GP do tipo 1: Durante o período de Fluxo Sincronizado a frente de onda mantém-se fixa. O efeito de disrupção é sentido a montante do nó de congestionamento, havendo uma queda substancial quer da velocidade média de propagação quer do fluxo de tráfego. A densidade elevada de veículos origina uma zona de compressão na via à qual fica associado o efeito de estrangulamento (*pinch effect*), o qual é responsável pela formação de Filas Móveis Curtas (*Narrow Moving Jams* ou NMJ's). Se o caudal médio da onda é superior ao caudal de descarga, isto é, ao caudal de saída, então o comprimento da estrutura vai aumentando e origina inclusivé a formação de WMJ's.
- GP do tipo 2: Difere do anterior pelo facto da estrutura apresentar uma zona de SP distinta

da zona de WMJ. As filas móveis longas formam-se a montante da zona de fluxo sincronizado. A propagação do WSP a montante é que leva ao aparecimento de NMJ's e posteriormente de WMJ's. Entre o local de origem do congestionamento e a primeira WMJ a velocidade vai progressivamente caindo ao longo da via. Com base em dados experimentais dos estudos levados a cabo por Kerner [11] constata-se que a frequência com que aparece uma Fila Móvel Longa na zona de compressão é inferior àquela que se verifica no GP do tipo 1. Quando a transição F-S se dá a jusante da localização geográfica do nó forma-se um SP que se propaga até atingir a via principal. Aí, são possíveis as seguintes hipóteses:

- Bloqueio forma-se ainda na rampa de saída: Neste cenário as NMJ's que existem no GP da via principal vão-se dissolver quando o seu caudal médio q é inferior ao caudal de saída q_{out} da WMJ ou fundir-se e formar uma WMJ quando o valor de q é superior ($q > q_{out}$).
- F-S dá-se exclusivamente na faixa mais à direita da via e num curto espaço de tempo: Dar-se-á posteriormente a sincronização de fluxos entre as várias faixas de rodagem e o congestionamento tende a disseminar-se por toda a via.
- F-S pode manter-se por um longo intervalo de tempo e afectar várias vias: Difere da situação acima porque não se observa o efeito de sincronização.

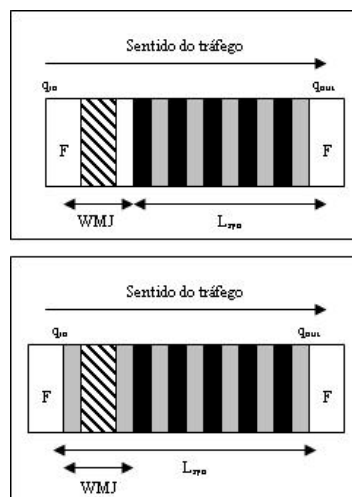


Figura 1.5 - GP do tipo 1 e do tipo 2

1.2. Transições

Sempre que ocorre uma queda abrupta da velocidade, quer seja num nó da via ou noutra local da auto-estrada, o sistema sofre uma transição de fases. Este fenómeno é designado na teoria 3F por *speed breakdown* e está associado à passagem do trânsito de Fluxo Livre para Fluxo Sincronizado, ou seja, da situação em que a via se encontra desbloqueada e os condutores circulam à velocidade desejada para uma estrutura de congestionamento onde os veículos vêm a sua velocidade limitada.

Existem duas formas de se dar a transição: espontânea ou induzida. Fala-se em mudança de fase espontânea quando esta se deve exclusivamente a características específicas da via, das condições climatéricas observadas, dos veículos em movimento ou dos condutores. A transição induzida sucede no local em estudo quando a passagem de fases do sistema se deve a perturbações externas que ocorreram a montante ou jusante do troço em análise e provocaram o desenvolvimento de estruturas de congestionamento que são responsáveis pela transição no ponto objecto da avaliação.

O sistema pode passar pelas seguintes fases:

- Fluxo Livre – Fluxo Sincronizado (F-S): Surge um padrão de congestionamento no trânsito que genericamente se nomeia de CP;
- Fluxo Sincronizado – Fluxo Livre (S-F): O congestionamento é dissolvido e o trânsito move-se em condições livres;
- Fluxo Sincronizado – Fila Móvel Longa (S-J): A transição está associada a uma maior severidade das condições de congestionamento. Nas Filas Móveis Alargadas os veículos que se encontram no interior da estrutura estão parados ou movem-se a velocidades muito baixas, enquanto aqueles que estão na frente dianteira do congestionamento aceleram para velocidades mais elevadas (geralmente tem-se a jusante da WMJ a fase F mas também é possível existir a fase S);
- Fila Móvel Longa - Fluxo Sincronizado (J-S): As condições de congestionamento melhoram, na medida em que a velocidade e o caudal do tráfego sobem e a densidade de veículos diminui. Todavia, a aceleração dos veículos que se encontram na frente dianteira da WMJ não é suficiente para que a jusante os condutores circulem livremente. Existem ainda condicionantes que não permitem aos condutores circularem à velocidade desejada;

- Fila Móvel Longa - Fluxo Livre (J-F): Os veículos aceleram na frente dianteira da onda de congestionamento para uma zona da via a jusante onde atingem as maiores velocidades observadas no sistema. Embora esta transição ocorra no trânsito, já a situação inversa não é observada. Antes do congestionamento alcançar a fase J teve obrigatoriamente de passar por uma situação de Fluxo Sincronizado (caudal do tráfego está próximo do caudal de Fluxo Livre, ao contrário do que sucede em J onde o caudal médio na fila de trânsito é muito baixo ou mesmo nulo e a densidade de veículos atinge o seu valor máximo).

Para além das transições acima referidas, o trânsito revela frequentemente uma ordem na mudança de fases. A sequência de transições mais comum é F-S-J, onde o tráfego se encontra inicialmente na situação de Fluxo Livre formando-se, a posteriori, um congestionamento em que a velocidade média cai abruptamente mas o fluxo de veículos continua elevado e, por fim, se regista a formação de uma fila de trânsito em que os veículos no seu interior estão imobilizados ou quase parados. Esta sequência é típica em padrões genéricos GP.

Saliente-se ainda outro aspecto empírico relacionado com as transições de fase do tráfego. Tem que ver com o efeito de histerese, o qual ocorre por formação e dissolução dos congestionamentos. Observa-se também que a duração da queda abrupta da velocidade num nó de congestionamento é geralmente de 1 minuto¹ e que a velocidade média após essa transição tende para um valor estável (pode oscilar +-10% em torno desse valor).

Após uma transição espontânea F-S num nó, o congestionamento tanto pode durar pouco tempo como perdurar durante várias horas, mas para que se propague tem de respeitar a seguinte condição:

$$q_{up} > q^{syn} \quad (1.2)$$

ou seja, o fluxo a montante do congestionamento tem de ser superior ao fluxo médio em S.

As transições têm uma natureza probabilística conforme mostram os dados experimentais dos estudos já realizados [23], [25]. A função probabilidade é independente do tempo (dependência espacial), mas quanto maior for o intervalo de amostragem T_{av} menor deverá ser o caudal crítico (valor para o qual se dá a transição). Para cada tipo de transição que se pode dar num mesmo

¹ Este é o valor comumente utilizado nos modelos matemáticos associado ao parâmetro do sistema que reflecte a duração média da transição FS (τ_{FS}). Os resultados do caso em estudo estão em linha com este valor.

ponto da via, seja F-S, S-J, ou outra, existe uma probabilidade distinta.

Usando o valor da probabilidade de transição F-S num nó P_{FS}^B é possível determinar a probabilidade do nó manter a capacidade de Fluxo Livre. A capacidade da via depende da localização considerada.

$$P_C^B = 1 - P_{FS}^B \leq 1 \quad (1.3)$$

Se a condição acima for respeitada o nó tem capacidade para que o trânsito possa fluir livremente, mas para $P_{FS}^B > 0$ quer dizer que pode ocorrer uma transição F-S no nó. Quando $P_{FS}^B = 0$ não há transição de fases, o que quer dizer que o caudal médio no nó em fluxo livre é inferior ao valor limiar ou de *threshold* para que se dê o congestionamento da via:

$$q^{free,B} < q_{tr}^B \quad (1.4)$$

Porém, não é fácil determinar a probabilidade da transição F-S pois em cada dia os parâmetros de controlo podem ser diferentes². Além disso, só podem ser tidos em conta os congestionamentos cuja duração seja superior ao tempo médio T_{av} utilizado para cálculo das variáveis de tráfego³. Assim, quando se fala na grandeza P_C^B trata-se de um valor médio. Assumindo que essa probabilidade é nula, ou seja, o nó deixa de estar em condições de manter a fase F do fluxo rodoviário, é possível determinar P_{FS}^B :

$$P_{FS}^B = \frac{n_i}{N_i} \Big|_{q_i = q_{max}^{free,B}} = 1 \quad (1.5)$$

em que N_i é o número de amostras para um determinado nível i do caudal e n_i é a frequência com que para esse nível se dá a transição.

Para obter um valor mais preciso é necessário considerar que o fluxo depende dos caudais na via principal e na via de acesso:

$$q_i = q_i(q_{on}, q_{in}) \quad (1.6)$$

² A validade estatística exige um número elevado de realizações realizadas sob as mesmas condições.

³ Se os valores médios da densidade, caudal e velocidade forem calculados para um intervalo $T_{av}=10$ minutos supõe-se que o congestionamento perdura por um período aproximado de 100 minutos.

À transição F-S surgem ainda associadas duas grandezas relevantes na análise do tráfego rodoviário: caudal de pré-descarga (*pre-discharge flow rate*) q_{FS}^B e caudal de descarga (*discharge flow rate*) q_{out}^B . q_{FS}^B é medido na frente dianteira do congestionamento, enquanto q_{out}^B é definido a partir de um ponto imediatamente a jusante de CP (na zona de Fluxo Livre).

$$q_{FS}^B(q_{on}, q_{in}) = q_C(q_{on}, q_{in}) \quad (1.7)$$

Conclusão: O caudal de pré-descarga permite definir a capacidade do nó em Fluxo Livre. E,

$$q_{th}^B(q_{on} |_{F_{th}^B}, q_{in}) \leq q_{FS}^B(q_{on}, q_{in}) \leq q_{max}^{free,B}(q_{on} |_{F_S^B}, q_{in}) \quad (1.8)$$

Conclusão: O caudal de pré-descarga situa-se entre o fluxo máximo alcançado na fase F, considerando a via de acesso com trânsito livre, e o fluxo mínimo atingido quando a rampa de acesso se encontra desimpedida.

O ponto empírico de caudal máximo $q_{max}^{free,emp}$ é condicionado pela quantidade de carros que entram no troço em análise, pelo tipo de congestionamento que se forma ou pela proximidade de outros nós adjacentes. Se $P_{FS}^B < 1$ a transição pode não suceder ou tem lugar mas para um valor de caudal inferior ao máximo empírico, ou seja:

$$q_{FS}^B < q_{max}^{free,emp} < q_C^B \quad (1.9)$$

Naturalmente, para valores inferiores à unidade a probabilidade de uma transição F-S acontecer num nó está relacionada com a hipótese de ocorrer uma perturbação aleatória na via ou que o fluxo na rampa de acesso à auto-estrada seja uma função crescente no tempo⁴. Neste caso, o maior caudal da via de acesso q_{on} leva ao aumento do caudal resultante q_{sum} na via principal:

$$q_{FS}^B < q_{sum} < q_{max}^{free,emp}.$$

Nestas condições deve haver uma queda significativa da velocidade e dar-se o fenómeno de *speed breakdown*. Este efeito pode, todavia, ser provocado por uma transição induzida.

⁴ Natureza probabilística da formação de congestionamentos nas vias rodoviárias.

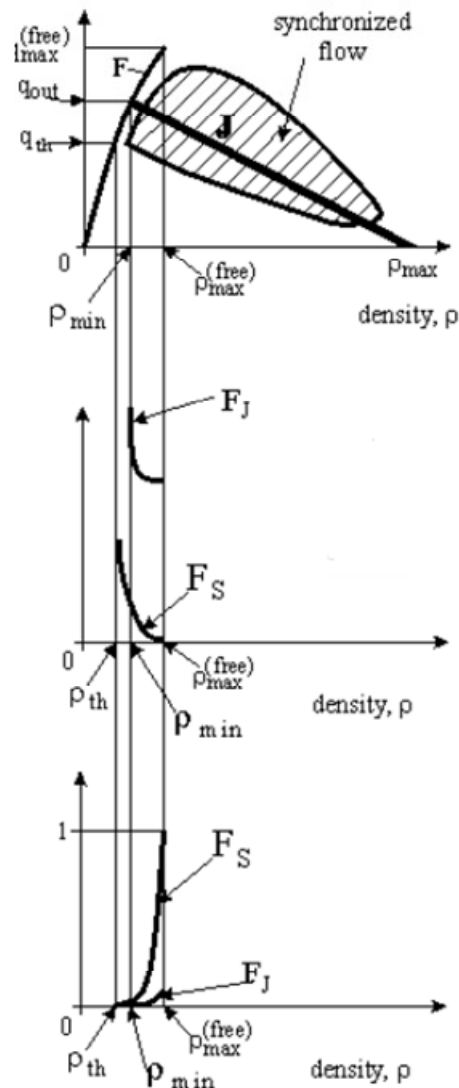


Figura 1.6 - Probabilidade da transição de fases (Kerner, 2004)

Se assim for a origem da queda abrupta da velocidade deve-se então a uma fonte exógena. O congestionamento estabelece-se mesmo após a perturbação exterior se ter extinguido. Embora a perturbação seja normalmente de curta-duração, a sua acção faz-se sentir para além desse intervalo de tempo, com a propagação a montante de um CP ou de uma WMJ.

Nos estudos empíricos elaborados por Kerner sublinha-se o facto da passagem de um padrão de congestionamento forasteiro originar uma transição induzida F-S no nó, que provoca não só a redução da velocidade dos veículos que circulam na via principal como estes forçam os veículos que vêm da via de acesso a abrandar. Donde, na vizinhança do nó nunca será possível ter uma

situação de Fluxo Livre.

Quando o nó é atingido por um padrão SP, tipicamente uma onda MSP, resulta na formação de uma estrutura LSP no nó. Dá-se o efeito de captura ou *catch effect* do padrão exterior e a frente dianteira da onda resultante fica fixa no nó. Se a causa da F-S induzida tem que ver com a propagação a montante de uma WMJ, então a estrutura que se forma no nó é independente da onda exterior.

Note-se que a velocidade de propagação da frente dianteira da WMJ é constante ao longo da propagação da estrutura e não depende das condições iniciais do trânsito ou da existência de nós a montante. Por outro lado, a velocidade de propagação da MSP pode ser muito maior que v_g e o fluxo médio está próximo do caudal em F (já na WMJ o fluxo é baixo ou mesmo nulo).

Tem-se abordado o fenómeno da queda de velocidade num nó onde existe uma via de acesso à auto-estrada. Todavia, é igualmente relevante analisar esse efeito num nó onde existe uma rampa de saída. Em nós desta natureza é comum definir-se o rácio $\delta = q_{\text{faixa direita}}/q_{\text{total}}$, função que dá a relação do número de veículos na proximidade do nó que circulam mais à direita na via face ao fluxo agregado das várias faixas de rodagem. Quando δ começa a crescer de forma sustentada é sinal de que existe um número significativo de veículos que mudam de faixa de rodagem e se encostam à direita para poderem sair da via principal. Devido à mudança de faixas há uma redução da velocidade, sendo que para um valor elevado da amplitude da perturbação pode ocorrer a transição F-S e instalar-se uma estrutura SP na via de saída. Geralmente, esse congestionamento forma-se a montante da localização geográfica do nó, ou seja, a localização efectiva do nó não coincide com a local do nó na via. Refira-se ainda que a propagação do padrão SP conduz muitas vezes a uma transição F-S induzida na via principal.

A queda de velocidade pode ainda dar-se numa zona da auto-estrada onde não exista qualquer nó físico. Nesse caso, a análise deve salvaguardar que nas condições iniciais existia a fase de Fluxo Livre, quer a montante, quer a jusante do ponto onde se forma o congestionamento, por forma a garantir que os efeitos observados nada têm que ver com estruturas forasteiras que possam eventualmente ter ocorrido noutros pontos da via. Tal como em transições que ocorrem nos nós, este fenómeno é também de 1ª ordem, com a diferença de que a propagação da onda de congestionamento tanto se faz para montante como a jusante do local onde se deu a transição F-S. Contudo, um padrão originado num nó físico tem tendência a ser auto-sustentado, podendo perdurar várias horas na via, enquanto uma estrutura de congestionamento formada longe de

qualquer intersecção de vias é de curta-duração e acontece de forma esporádica.

Conclui-se, portanto, que em transições espontâneas se tem $P_{FS}^B=1$, sendo que esta ocorre para os valores máximos do caudal e densidade, ou seja, a capacidade do nó é atingida. No caso de transições induzidas $P_{FS}^B<1$, logo a transição se ocorrer sucede para valores abaixo da capacidade do nó.

A teoria 3F refuta a hipótese central da abordagem do Diagrama Fundamental, na qual todos os estados estáveis do trânsito se encontram localizados numa curva característica no plano $q(\rho)$. Os seus defensores estenderam essa fundamentação para poderam analisar a complexidade revelada pelo trânsito em situações de congestionamento e assim captarem as variações que se observam no sistema ao longo do tempo e do espaço. Assim, concluíram que durante os congestionamentos existem estados estáveis do sistema que cobrem uma região 2D e não estão exclusivamente localizados sobre uma curva. Com efeito, verificam que para um mesmo valor do caudal podem existir diferentes valores de densidade, estando os pontos (q_i, ρ_i) associados tanto a declives positivos como negativos (velocidades crescentes ou decrescentes no interior da estrutura de congestionamento).

Por forma a diferenciar a multitudine de estados possíveis durante o congestionamento são definidos os seguintes tipos:

- Estados uniformes: velocidade e caudal não sofrem grandes variações;
- Estados de velocidade homogénea: velocidade não se reduz drasticamente, mantendo-se constante durante um largo período de tempo. q e ρ variam bruscamente e o caudal é diferente nas várias faixas. Esses estados formam uma recta de declive constante;
- Estados não-estacionários: q e v mudam drasticamente e não existe qualquer correlação entre ambos, ao contrário do que sucede nos estados anteriores.

É de salientar que a variância da velocidade na fase S é inferior à da fase F. Tal facto empírico está ligado a uma maior correlação espacial da velocidade durante o congestionamento, o que é observado através da formação de colunas de veículos ao longo da via em que estes circulam a velocidades similares. Já o sincronismo de velocidades entre vias é mais improvável em estados não-estacionários ou nas zonas de estrangulamento onde as acelerações podem ser muito diferentes⁵.

⁵ Os resultados empíricos do estudo confirmam esta proposição.

Podem também existir estados associados à fase F e outros à fase S que se sobrepõem nos planos $v(\rho)$ e $q(\rho)$. Calculando a diferença média das velocidades no interior do congestionamento Δv , conclui-se que para um mesmo valor da densidade em F e S podem existir vários Δv ⁶. O mesmo sucede se a análise incidir sobre a variável caudal. A sobreposição de estados de fases distintas no diagrama empírico está relacionada com o efeito de histerese do trânsito. Note-se que quanto menor for a velocidade média no interior do congestionamento v^{syn} , existem menos valores possíveis de densidade de veículos no seio do congestionamento ρ^{syn} para os quais existe sobreposição de estados S e F. Releva ainda a observância de velocidades individuais distintas em Fluxo Livre, conforme as características do veículo em causa. Por exemplo, se em Fluxo Sincronizado a velocidade de um automóvel ligeiro pode ser sensivelmente a mesma que um veículo pesado, já em F as velocidades diferem bastante.

1.3. Fila Móvel Longa (WMJ)

O principal critério para identificação de uma Fila Móvel Longa, ou, *Wide Moving Jam* (WMJ) prende-se com a velocidade média de propagação da frente de onda dianteira v_g . Quando se está perante uma WMJ a velocidade média de propagação da frente de onda dianteira é constante, independentemente de atravessar outros nós existentes a montante na via. v_g é assim um parâmetro característico desta fase do sistema.

Com efeito, as experiências já realizadas revelam que diferentes WMJ's têm iguais características. Apresentando padrões com comportamento similar formados a partir da frente de onda dianteira, estas acabam por apresentar valores idênticos para os parâmetros que as caracterizam, nomeadamente: caudal de saída q_{out} , velocidade média da onda v_{max} , densidade de veículos a jusante da onda ρ_{min} e a densidade de veículos no interior da onda ρ_{max} . Os seus valores médios permanecem constantes ao longo do tempo.

Outras relações interessantes associadas à análise de WMJ's é, por exemplo, o facto do caudal máximo em F, q_{max}^{free} , ser significativamente superior ao caudal de saída da frente dianteira q_{out} da WMJ. Releva igualmente um outro aspecto que está ligado ao crescimento monotónico da WMJ. Nesta situação verifica-se que as frentes dianteiras das ondas móveis que se venham a

⁶ Idem.

formar na via tendem para a auto-organização, formando estruturas móveis estáveis cujo comportamento é idêntico à frente dianteira da WMJ. É possível analisar todas estas ondas móveis como um único padrão que se propaga na auto-estrada.

Uma forma de estudar as WMJ's é então a partir do seu parâmetro característico v_g , o qual é independente das condições iniciais do trânsito ou da fase que se encontre a jusante da frente dianteira da WMJ. Sendo constante, a velocidade de propagação pode ser traçada no diagrama fundamental por uma linha cujo declive é o valor de v_g . A essa recta dá-se o nome de “linha J” e pode ser determinada através das medidas recolhidas num detector para a velocidade e caudal. Com base na distância entre detectores é possível determinar v_g . Um valor típico é $v_g = -15$ km/h para um fluxo total de saída $q_{out} = 4500$ veículos/h/faixa.

A “linha J” é definida pelos pontos extremos (ρ_{min}, q_{out}) e $(\rho_{max}, 0)$ em que q_{out} é dado por:

$$q_{out} = \rho_{min} \cdot v_{max} \quad (1.10)$$

Note-se que ρ_{max} é agora facilmente determinado, pois a partir do primeiro ponto é possível traçar a recta com o declive dado por v_g e prolongar essa recta até à intersecção com o eixo das abcissas. O ponto de intersecção dá o valor de ρ_{max} .

Com base nas observações realizadas por Kerner [1], a diferença do número de veículos que circulam em cada uma das faixas somente afecta o valor quantitativo dos fluxos e densidades. Em termos qualitativos, não se vislumbra quaisquer alterações na dinâmica da WMJ.

Deve-se ainda considerar na medição do caudal de saída da onda de congestionamento q_{out} que é realizada em local suficientemente afastado de eventuais pontos de acesso ou saída da via, de forma a não haver interferências no fluxo (podem ocorrer variações que nada têm que ver com a situação suposta a jusante da frente de onda dianteira).

Como já foi acima referido o caudal máximo empírico na fase de Fluxo Livre, o qual se encontra a jusante da frente de onda dianteira da WMJ, pode ser significativamente superior a esta, ou seja, $q_{max}^{free,emp} > q_{out}$. Na realidade, mesmo alterando os parâmetros de controlo (ex: condições climatéricas ou condicionamento da via) a relação entre ambos mantém-se constante e é aproximadamente:

$$\frac{q_{max}^{free,emp}}{q_{out}} \approx 1,5 \quad (1.11)$$

ou seja, o caudal máximo observado na via livre é 50% superior ao caudal de descarga da Fila Móvel Longa. Tratando-se de um resultado das experiências até à data realizadas e divulgadas deve ser encarado como meramente uma indicação nos estudos em desenvolvimento. Este valor é obtido para um intervalo $T_{av} = 1$ minuto. Para tempos superiores (ex: $T_{av} > 10$ minutos) este rácio tende a diminuir, pois o limite empírico do caudal em $F - q_{max}^{free,emp}$ - será menor.

É também possível determinar os tempos médios de passagem entre veículos τ_{min}^{free} (intervalo de tempo entre a passagem de veículos no ponto máximo de fluxo livre) e de reacção τ_{del}^a (atraso médio da aceleração do veículo na frente da WMJ). Esses tempos podem ser calculados para cada uma das faixas de rodagem ou para a totalidade da via, basta atentar no valor anteriormente definido para a densidade no interior da WMJ ρ_{max} . Os tempos encontram-se nos intervalos

$$1,3 \leq \tau_{min}^{free} \leq 2,2 \text{ e } 1,7 \leq \tau_{del}^a \leq 2,8 \quad (1.12)$$

Embora a relação entre o caudal máximo em F e o caudal de saída da WMJ se mantenha constante independentemente dos parâmetros de controlo, já não sucede o mesmo quanto ao parâmetro característico da WMJ. Na realidade, v_g pode variar substancialmente para dias diferentes, basta que se alterem as condições climáticas. A título ilustrativo, chuvas fortes ou um nevoeiro intenso são factores suficientes per si para provocarem uma alteração no valor da velocidade de propagação da frente de onda dianteira da WMJ.

Na transição entre as fases J-S os parâmetros q_{out} , ρ_{min} e v_{max} não são característicos como acontece na mudança J-F. Se os designarmos por q_{out}^{syn} , ρ_{min}^{syn} e v_{max}^{syn} quando se tem um congestionamento a jusante da WMJ verifica-se que

$$q_{out}^{syn} \leq q_{out} \text{ e } \rho_{min}^{syn} \geq \rho_{min} \quad (1.13)$$

os quais variam em função do SP a jusante e da sua intensidade.

Porém, v_g continua a ser um parâmetro característico (define uma WMJ). O caudal da saída q_{out}^{syn} da WMJ continua associado a um ponto sobre a “Linha J”. Fazendo a média dos valores de q_{out}^{syn} e v_{max}^{syn} para um dado intervalo temporal (ex: entre 5 a 10 minutos) determina-se ρ_{min}^{syn} . Obtem-se assim o máximo da “Linha J”. Ao estendermos esse ponto até à intersecção com a recta F encontra-se o ponto de coordenadas (ρ_{min}, q_{out}) , uma estimativa do caudal e densidade de saída da Fila Móvel Longa se o sistema se encontrasse na fase livre no troço a jusante da WMJ.

Podem existir Filas Móveis Longas Externas (*Foreign Wide Moving Jam*) que são WMJ

formadas a jusante e que atingem a estrutura de congestionamento formada no nó em análise. Quando devido à sua propagação a montante chegam ao padrão de estudo afectam a evolução das NMJ's que possam existir, na medida em que as Filas Móveis Curtas mais próximas acabam por desaparecer e as mais afastadas constituem-se em WMJ's. O efeito de supressão das NMJ's por uma onda forasteira ocorre igualmente numa zona de compressão (*pinch region*) de um GP quando estas Filas Móveis Curtas apresentam uma frente de onda similar à FWMJ. Em síntese, a propagação de uma FWMJ através de um GP leva à constituição de uma sequência interligada de WMJ's que emergiram no GP e das ondas forasteiras que lhes deram origem.

1.4. Formação das filas móveis

A análise das filas de congestionamento do trânsito é provavelmente uma das áreas que tem merecido maior atenção por parte dos grupos científicos que fazem investigação neste campo. Todavia, é no âmbito deste estudo que se vê mais claramente as limitações das abordagens baseadas exclusivamente no Diagrama Fundamental. É neste ponto que muitos dos modelos propostos falham face aos resultados experimentais.

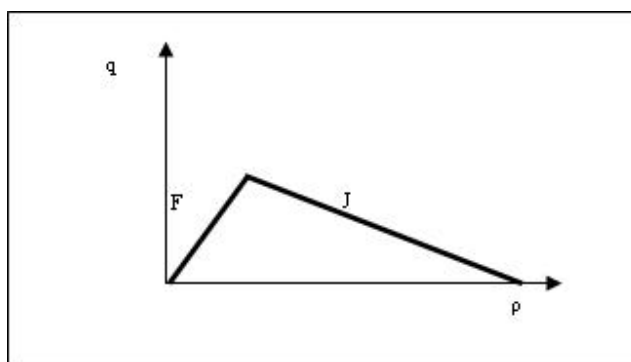


Figura 1.7 - Diagrama Fundamental. Curva F associada à fase de Fluxo Livre e a “linha J” associada à fase de Fila Móvel Longa

Um dos motivos para o desajustamento entre teoria e realidade tem que ver com a premissa do Diagrama Fundamental que prevê a transição espontânea entre as fases de Fluxo Livre e de Filas Móveis Longas.

Ora, na teoria 3F a transição F-J não é possível. O congestionamento do trânsito composto por uma ou mais WMJ's só se estabelece após a situação de Fluxo Sincronizado, ou seja, após uma

transição F-S é que pode ocorrer uma transição S-J⁷.

As WMJ's podem-se formar num GP (padrão constituído por uma estrutura SP, NMJ's e por WMJ's) a montante da onda de Fluxo Sincronizado ou ainda no interior da região S. Refira-se que um GP é o tipo mais comum de congestionamento em nós isolados da via.

No GP do tipo 1 as Filas Móveis Longas formam-se fora da região de Fluxo Sincronizado L_{syn} , onde se localizam as Filas Móveis Curtas. Como a cauda de S coincide com a frente de onda de J está subjacente uma transição S-J. Assim, o comprimento de S é fixo e a onda de Fluxo Sincronizado está espacialmente limitada (tem geralmente um comprimento aproximado de 3-4 km). L_{syn} (comprimento da zona de trânsito comprimido) não depende do fluxo de tráfego a montante (caudal de entrada q_{in}). A propagação na via sucede na fase J por intermédio das WMJ's. Entre estas pode existir alternância com fases de Fluxo Sincronizado (geralmente quando a distância entre WMJ's é inferior a 1,5 km) ou de Fluxo Livre. Donde, constituem-se padrões denominados de AGP (*Alternating GP*).

No GP do tipo 2 a onda de Fluxo Sincronizado pode propagar-se livremente para montante, pois as WMJ's ocorrem no seu interior. Para que um padrão deste tipo persista é necessário que a velocidade de propagação da cauda de S seja mais negativa do que a velocidade de propagação da frente da WMJ que se encontra mais a montante na estrutura. As Filas Móveis Longas podem ocorrer em qualquer ponto da via pela transformação das NMJ's, havendo por conseguinte lugar a oscilações complexas do tráfego na cauda de S.

⁷ No Diagrama Fundamental Empírico em vez de uma recta os estados pertencentes ao congestionamento formam uma região 2D. Esses pontos encontram-se dispersos no diagrama.

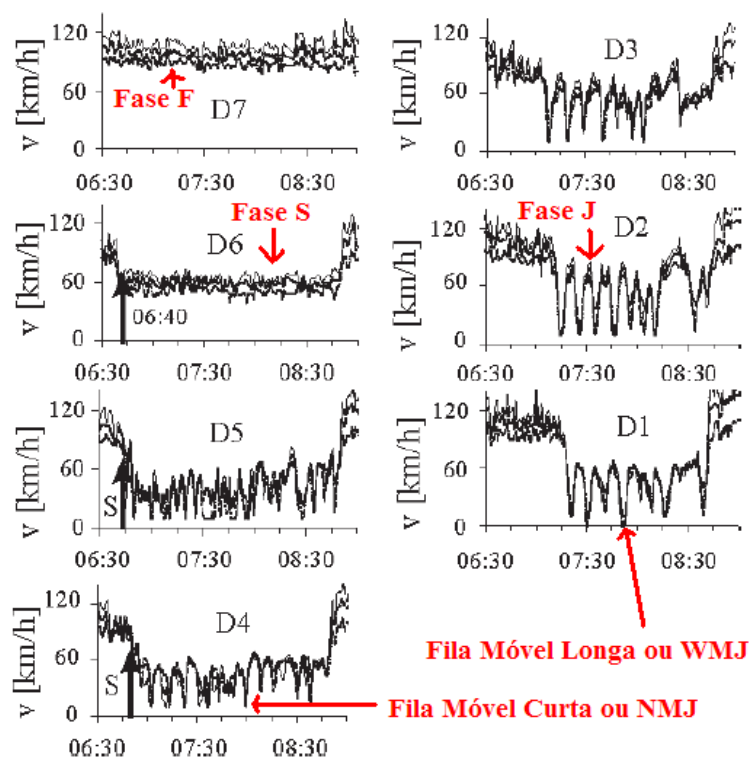


Figura 1.8 - Exemplo de transições de fase do trânsito típicas em congestionamentos do tipo GP

Relembre-se que um GP só ocorre se existir uma zona de estrangulamento do trânsito (*pinch region*) durante a fase S. Nessa zona a velocidade é reduzida e a densidade de veículos aumenta bruscamente. O fluxo cai significativamente antes mesmo do nascimento de WMJ's a montante, embora atinja um valor limite a partir do qual as variações não excedem $\pm 10\%$ (efeito de saturação que perdura ao longo do tempo para diversas intensidades de tráfego). Criam-se Filas Móveis Curtas que crescem e se vão propagando para montante. A frente está fixa na localização efectiva do nó de congestionamento e, caso se esteja perante um GP do tipo 1, a cauda termina no local onde a última NMJ se transforma numa Fila Móvel Longa (ponto da transição S-J). As Filas Móveis Curtas que se encontram próximo da frente da WMJ ou se dissolvem ou se fundem com esta. Como ao longo da zona de estrangulamento se dá o crescimento das NMJ's conforme se propagam para montante, a velocidade e densidade apresentam valores bastante dispersos.

Empiricamente verifica-se que os pontos associados a S entre NMJ's se encontram acima da "linha J" no plano $q(\rho)$ ⁸. Normalmente, as NMJ's apresentam uma velocidade mais negativa do

⁸ Estados metaestáveis em relação a J. O crescimento das perturbações no congestionamento podem levar à

que a velocidade característica da frente dianteira da WMJ

$$|v_{narrow}| > |v_g| \quad (1.14)$$

donde se devem identificar metaestados na zona acima da “linha J” no plano $q(\rho)$.

A transformação de NMJ’s em WMJ’s acontece porque o caudal de entrada da Fila Móvel Curta (fluxo na cauda da onda) é superior ao caudal de saída (fluxo na frente da onda). Se se atentar no fluxo de saída da Fila Móvel Longa, mais a jusante, verifica-se que o seu valor é superior ao caudal médio na zona de compressão ($q_{out} > q^{pinch}$). Ora, sendo o fluxo de saída da WMJ o caudal de entrada na zona de estrangulamento justifica-se qualitativamente o fenómeno observado no trânsito de conversão das NMJ’s em WMJ’s.

A evolução da Fila Móvel Curta, cujo comprimento cresce de forma monotónica, apresenta um efeito de auto-organização [33], na medida em que há uma transformação espontânea em Fila Móvel Longa. No diagrama fundamental empírico os estados que se encontram acima da “linha J” no nó e nas zonas imediatamente contíguas vão tendendo assintoticamente para a “linha J” com a propagação espacial do padrão⁹. Todavia, o declive da recta J pode variar em função do intervalo de tempo que se considere no cálculo da velocidade da cauda da WMJ. Ao contrário do que sucede com a velocidade de propagação na frente da onda que se mantém constante durante o alastramento da fila, v_g^{up} acaba por variar. Observa-se que em determinados períodos $|v_g^{up}| > |v_g|$ e vice-versa, ou seja, em certos intervalos de tempo o comprimento da Fila Móvel Longa cresce e noutros decresce.

Quanto ao caudal de descarga q_{out} , isto é, o fluxo de veículos em F a jusante do GP, verifica-se que pode variar substancialmente para diferentes observações. Isto acontece porque o caudal médio da zona de compressão q^{pinch} também varia significativamente para dias diferentes como foi dito acima. Note-se que

$$q_{out} \approx q^{pinch} + q_{on} \quad (1.15)$$

em que q_{on} é o caudal da via de acesso. Compreende-se desta forma a variação do caudal de

formação de WMJ e consequentemente à mudança de fases do sistema.

⁹ Estados sobre a “Linha J” estão associados com a fase de bloqueio ou WMJ. O declive da curva representa a velocidade de propagação da onda v_g , que como se viu é constante.

descarga.

Existe uma correlação entre os caudais q_{out}^B e q^{pinch} e o caudal de saída da WMJ q_{out} . Na verdade, como o caudal q^{pinch} está associado a estados no diagrama fundamental que se encontram acima da “linha J” tem-se:

$$q_{lim}^{pinch} < q_{out} \quad (1.16)$$

Sempre que q_{lim}^{pinch} sobe observa-se que o valor do fluxo de saída da WMJ também aumenta. Há uma correlação entre ambas as variáveis, cujos resultados empíricos apresentados em [1]:

$$1,2 \leq \frac{q_{out}}{q_{lim}^{pinch}} \leq 1,5 \quad (1.17)$$

Recorrendo a (1.11) e substituindo em (1.17) vem:

$$1,8 \leq \frac{q_{max}^{free}}{q_{lim}^{pinch}} \leq 2,25 \quad (1.18)$$

É ainda possível extrair uma outra característica das Filas Móveis Curtas que tem que ver com o tempo entre duas ondas consecutivas. Este tempo médio, denominado T_J , é nas experiências realizadas na ordem dos 5 a 7 minutos e depende essencialmente do valor médio mínimo da distância entre NMJ's (aproximadamente de 1,5 km). Ambos os valores atingem o seu mínimo quando há a queda da velocidade média do Fluxo Sincronizado na zona de compressão. Se se pretender obter a frequência máxima para a emergência de uma NMJ na zona de estrangulamento basta aplicar a seguinte fórmula:

$$f_{narrow} = f_{max} = \frac{1}{T_{J,lim}} \quad (1.19)$$

O cálculo destas variáveis do tráfego na zona de estrangulamento está associado ao efeito de saturação. Portanto, o crescimento do caudal da via de acesso deixa a partir de um certo ponto de afectar a frequência com que as Filas Móveis Curtas surgem no GP. Essa frequência é f_{max} .

A saturação do trânsito afecta igualmente a dinâmica com que se dá a supressão das NMJ's próximas das Filas Móveis Longas. O desaparecimento das Filas Móveis Curtas acontece sempre que a distância entre estas é inferior à distância entre Filas Móveis Longas. Resultados

experimentais apontam para o valor de 2,5 km. Contudo, há um limite a partir do qual a dissolução das NMJ's se deixa de verificar.

Um outro aspecto em que o efeito de saturação se revela é no tempo médio que medeia o aparecimento da Fila Móvel Curta $T_{\text{narrow}}^{\text{mean}}$ e a transição S-J. $T_{\text{narrow}}^{\text{mean}}$ é constante e ronda os 11 minutos (11 vezes mais que a transição F-S que dura geralmente 1 minuto), assumindo naturalmente que as condições de trânsito (parâmetros de controlo) não se alteram e que q^{pinch} está próximo de $q_{\text{lim}}^{\text{pinch}}$.

O efeito de saturação também influencia o período de autocorrelação da velocidade T_C . Esta função é calculada durante a emergência de NMJ's em diferentes pontos da via. Quanto maior for a amplitude e o período da Fila Móvel Curta T_{narrow} maior será o período de autocorrelação da velocidade. O máximo é atingido quando a NMJ se transforma numa WMJ, enquanto o mínimo acontece no ponto de estrangulamento. A função de autocorrelação de velocidades é dada por:

$$R_{VV}(k\Delta t) = \frac{1}{\sigma^2(N-k)} \sum_{n=1}^{N-k} [(v_n - \langle v \rangle) \cdot (v_{n+k} - \langle v \rangle)] \quad (1.20)$$

Em que $\Delta t = 1 \text{ min.}$, v é a velocidade do veículo, $v_n = v(t_n)$ é a série temporal e t_n é o tempo no intervalo $t_0 < t_n < t_N$ (com $n=1, 2, \dots, N$). N é o número de pontos no intervalo de tempo e $\langle v \rangle$ é a velocidade média nesse intervalo, sendo dada pela expressão:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n \quad (1.21)$$

e a variância por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (v_n - \langle v \rangle)^2 \quad (1.22)$$

O valor máximo de k é $N/2$.

Experimentalmente, verifica-se que T_C pouco varia na zona de compressão, mas apresenta valores diferentes nas diversas realizações no local onde se forma a WMJ. Em [16] confirma-se que esse período pode ser inferior ao tempo médio T_J entre duas NMJ's. Isso acontece porque Filas Móveis Curtas com baixa amplitude conduzem a um tempo médio de separação entre elas menor, mas a sua influência no período T_C também é reduzida.

Excepcionalmente, surgem WMJ's no interior da zona de estrangulamento devido a um nó localizado nessa região. A montante da intersecção mas na vizinhança do nó forma-se a WMJ, observando-se a jusante da frente a situação de Fluxo Livre (a velocidade aumenta e há uma transição S-F). Todavia, o caudal reduzido que se faz sentir no nó só dura durante um certo intervalo de tempo, pois a propagação da WMJ leva ao aumento do fluxo na intersecção (velocidade decresce e há novamente uma transição F-S). Durante a evolução da WMJ na zona de estrangulamento dá-se também o efeito de dispersão das NMJ's próximas da frente da Fila Móvel Longa.

Quanto aos GP's que se formam na zona de estrangulamento é possível classificá-los segundo uma característica adicional. O GP do tipo 1 está geralmente ligado à condição de congestionamento forte (*strong congestion*), enquanto o GP do tipo 2 está relacionado com a condição de congestionamento fraco (*weak congestion*).

O congestionamento forte existe quando o fluxo no nó de congestionamento está próximo do seu valor máximo, induzindo um caudal na zona de compressão na vizinhança de q_{lim}^{pinch} . Nestas circunstâncias, a velocidade média na zona de estrangulamento v_{av} é baixa e o caudal médio é auto-sustentável, sendo o período de separação entre NMJ's: $T_J = T_{J,lim}$. O comprimento médio do Fluxo Sincronizado no interior do GP L_{syn}^{pinch} está limitado e é independente da intensidade de tráfego.

Porém, quando o valor do fluxo no nó de congestionamento desce abaixo de um certo valor, a velocidade média na zona de compressão cresce gradualmente. O caudal médio nessa zona deixa de ser auto-sustentável e diverge de q_{lim}^{pinch} . Está-se perante um congestionamento fraco onde o tempo médio de separação entre Filas Móveis Curtas tende a aumentar em consonância com o aumento da velocidade média na zona de estrangulamento. Ora, como se viu anteriormente, quanto maior for a velocidade média maior será a distância inicial R_{narrow} entre NMJ's. Se R_{narrow} igualar ou exceder a distância mínima L_{min}^J entre WMJ's, cenário que se pode efectivar, o crescimento da NMJ pode conduzir à emergência de uma WMJ. Se a velocidade for suficientemente elevada em S então não há lugar ao aparecimento de qualquer Fila Móvel Longa.

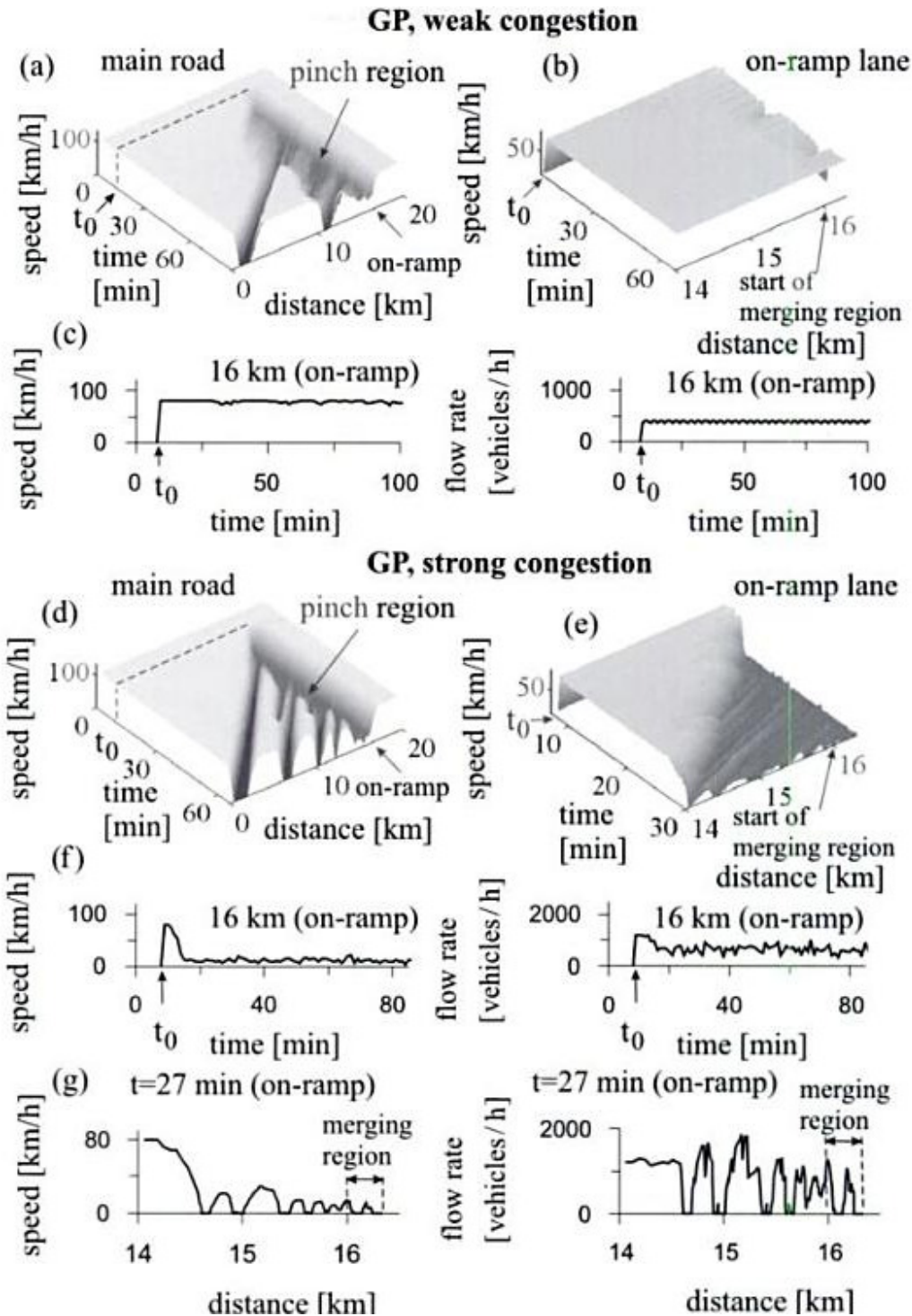


Figura 1.9 - Exemplo de congestionamento forte e fraco extraído (Kerner, 2004)

As considerações cerzidas até aqui supõem que se dá a cascata de transições F-S-J. Inicialmente ocorre uma transição F-S no nó de congestionamento ou na sua vizinhança e só mais tarde num local mais afastado se dá a transição S-J. Logo, a passagem da fase de Fluxo Sincronizado para a fase de Fila Móvel Longa acontece longe do nó de congestionamento. É portanto viável considerar que se S ocorrer numa zona afastada do nó da via continua a ser possível a ocorrência de uma zona de compressão do trânsito e consequente constituição de NMJ's. O crescimento das Filas Móveis Curtas pode assim dar lugar ao aparecimento de Filas Móveis Longas (transição S-J no seio da região de Fluxo Sincronizado). A diferença é que neste tipo de GP caem, simultaneamente, a velocidade e o caudal na zona de compressão. A propagação das Filas Móveis Curtas revela o efeito de auto-formação de WMJ's, pois conforme as NMJ's se movem a montante vão crescendo em amplitude e os valores da velocidade e fluxo tendem para ser nulos. Após o estabelecimento da Fila Móvel Longa, a propagação dá-se para montante através de outros nós que possam existir na via e passando por vários estados complexos de trânsito, mantendo-se como é expectável v_g constante.

Embora os padrões que se verificam em vias de acesso existam igualmente em vias de saída de uma auto-estrada, os resultados experimentais dos estudos realizados por Kerner evidenciam algumas peculiaridades associadas ao GP, designadamente:

- A transição F-S dá-se a montante do nó: o caudal na zona de compressão não é muito inferior ao fluxo em F e para pontos afastados da zona de NMJ's têm-se velocidades bastante superiores àquelas que se medem na região de estrangulamento;
- Os GP's que se observam estão exclusivamente ligados à condição de congestionamento fraco: A cauda de S vai crescendo progressivamente não estando limitada como acontece na situação de congestionamento forte. A transição S-J não impõe essa fronteira e só depois da propagação de S a montante é que se estabelece a fase de Fila Móvel Longa, característica de um GP do tipo 2.

Embora a teoria 3F refute a ocorrência de uma transição F-J espontânea é possível a realização de uma transição F-J induzida. A mudança de fases pode acontecer se o caudal em Fluxo Livre for superior ao caudal q_{out} . Neste caso, tem de se estar perante uma situação de meta-estabilidade em F face à formação de WMJ. Empiricamente observa-se este fenómeno em nós de saída da auto-estrada, em que há uma queda abrupta da velocidade na rampa ou via de saída. Contudo, a jusante a velocidade mantém-se, donde a redução pontual da velocidade pode ser

considerada como uma perturbação local da velocidade. Se se aliar o facto do caudal também não se alterar significativamente a jusante chega-se à conclusão de que há um aumento da densidade de veículos na perturbação. Como esta se propaga para montante atinge a via principal, a qual se encontra em situação de Fluxo Livre e pode estar num meta-estado face à fase J. Se esta última condição é respeitada e se a velocidade no interior da perturbação é suficientemente baixa (alta amplitude) esta cresce e conduz ao surgimento de uma transição F-J na via principal (a transição F-S não se dá pois não há sincronização de velocidades entre as várias faixas de rodagem; a perturbação atinge somente a faixa mais à direita na via principal). Note-se que dizer que F está em meta-estabilidade face a J é assumir que podem emergir NMJ's na fase de Fluxo Livre - devido ao crescimento da perturbação externa - que por sua vez dão origem a WMJ's quando a velocidade no seu interior é baixa. Este efeito é observado, sobretudo, quando a maioria dos veículos que circulam na auto-estrada pretendem sair da via principal e aqueles que se encontram na faixa à direita não pretendem mudar de direcção, ou seja, a queda de velocidade que se faz sentir na faixa que dá acesso à saída devido à mudança de vias dos veículos que circulavam nas outras faixas da auto-estrada não leva a maioria dos veículos que se movem na direita a mudar de faixa porque pretendem efectivamente sair, tendo-se assim fluxos muito inferiores nas faixas de rodagem mais à esquerda e logo não há sincronismo de velocidade (não há transição F-S).

1.5. Transformação e evolução dos padrões

Sempre que os fluxos de tráfego na via principal q_{in} e na via de acesso à auto-estrada q_{on} são elevados constata-se a existência no nó de um padrão de congestionamento do tipo GP, isto é, uma estrutura composta por uma zona de Fluxo Sincronizado com Filas Móveis Curtas que dão origem ou estão limitadas a montante por uma fase J. Se ambos os caudais descerem significativamente o trânsito que se encontra no interior do padrão sob uma situação de forte congestionamento transitará para um cenário de fraco congestionamento. Se mesmo assim o fluxo da via de acesso se mantiver em queda o GP dará lugar a um tipo de padrão SP (LSP, WSP, MSP ou DGP). Só mais tarde o trânsito poderá regressar no nó à fase de Fluxo Livre.

Muitas vezes observa-se que durante o decaimento do fluxo na via de acesso existem pontos da via que alternam entre as fases F e S. Quando no nó de congestionamento o Fluxo

Sincronizado for auto-sustentável e emergirem Filas Móveis Longas na zona mais a montante do congestionamento está-se perante um Padrão Geral de Congestionamento Alternado ou AGP (*Alternating General Pattern*). Para análise do tráfego esta estrutura pode ser decomposta em dois padrões mais simples, nomeadamente um LSP próximo do nó e um MSP na zona afastada do nó - onde posteriormente se formam as WMJ's. Existe um padrão similar designado por ASP (*Alternating Synchronized Pattern*), tal como o AGP pode ser visto como a agregação de um LSP com um MSP. A diferença reside no facto de não se constituírem Filas Móveis Alargadas a partir do MSP.

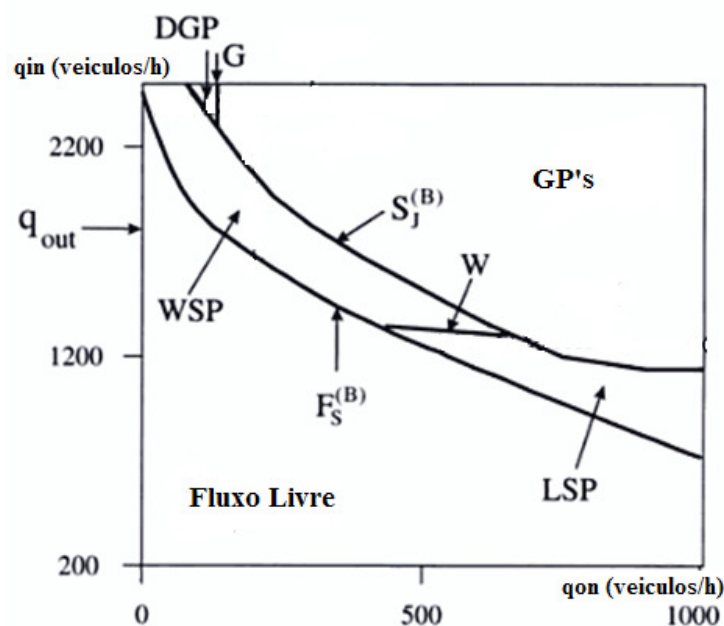


Figura 1.10 - Diagrama com os vários padrões de congestionamento em função dos fluxos na via principal e na via de acesso (Kerner, 2004)

O processo de transformação de padrões e a sua posterior dissolução leva à realização do efeito de histerese. Este efeito é caracterizado pela sequência no tempo das transições F-S (em que se dá uma queda abrupta da velocidade) e S-F (mudança de fase deve-se ao aumento abrupto da velocidade). Geralmente, a transição de Fluxo Sincronizado para Fluxo Livre sucede num primeiro instante na zona mais a montante do GP e propaga-se para jusante até atingir o nó de congestionamento. Nesse momento o GP é dissolvido e a via fica livre. Pode, excepcionalmente, verificar-se que a dissolução do GP está ligada à formação de WMJ. Neste caso a jusante da frente da WMJ o trânsito encontra-se na fase de Fluxo Livre, podendo esta propagar-se até ao nó

e extinguir assim a zona de Fluxo Sincronizado do GP.

O fenómeno de dissolução de uma AGP ou ASP é semelhante, mas para estes padrões a análise pode ser feita considerando que existem duas estruturas independentes (um LSP ou WSP e um MSP que pode ou não originar WMJ's). Tal como para o GP, há uma transição S-F só que esta tem início simultâneamente nas caudas do LSP ou WSP e do MSP. Para comprimentos diferentes dos padrões de congestionamento ter-se-á tempos de dissolução distintos, portanto é possível observar situações no trânsito em que se dá primeiramente a dissolução do congestionamento no nó do que no MSP/WJM a montante.

Um outro aspecto curioso é a facilidade com que ocorrem transformações dos padrões de congestionamento em nós de saída da auto-estrada. É comum em situação de fraco congestionamento assistir em nós desta natureza à alternância entre GP's e SP's. Com efeito, a maioria dos GP's que se formam são de curta-duração e dão origem a uma única WMJ, ou seja, são DGP's (*Dissolving General Pattern*). Esta estrutura conduz à formação de um SP, tipicamente um padrão do tipo WSP. Mais tarde, o SP transforma-se espontâneamente num GP.

Para além da evolução dos padrões de congestionamento é relevante analisar o caudal de descarga do nó q_{out}^B , o qual é medido na fase de Fluxo Livre no troço imediatamente a jusante. Empiricamente o caudal de descarga pode assumir uma gama alargada de valores, podendo o seu valor máximo $q_{out,max}^B$ exceder o valor do fluxo a jusante da frente da WMJ q_{out} . O mínimo $q_{out,min}^B$ também pode ser inferior a q_{out} . O valor que venha a assumir depende das características do nó, do tipo de congestionamento que se forma, da intensidade do tráfego ($q_{sum} = q_{in} + q_{on}$) e dos parâmetros de controlo (ex: condições atmosféricas).

O caudal de descarga pode variar muito ou pouco consoante se trate, respectivamente, de um nó de acesso ou de um nó de saída. Isto acontece porque geralmente associado ao nó de acesso se tem um GP sob forte congestionamento. Durante a formação do padrão q_{out}^B é elevado devido ao alto fluxo da rampa de acesso. Todavia, o caudal da rampa vai decaindo até atingir q_{lim}^{pinch} e a descarga no nó acompanha a queda. Com as transformações seguintes do padrão, q_{out}^B continua a diminuir, podendo assim ser inferior ao caudal de descarga q_{out} da WMJ.

O efeito de perda da Capacidade da Via ou *Capacity Drop* está relacionado com a diferença entre a capacidade do nó em Fluxo Livre e o caudal de descarga (traduz a capacidade do nó após a situação de congestionamento). Tem-se:

$$\delta q = q_{\max}^{free,B} - q_{out}^B \quad (1.23)$$

sendo o mínimo de perda da capacidade dado por:

$$\delta q_{\min} = q_{\max}^{free,B} - q_{out,\max}^B \quad (1.24)$$

Atente-se no facto de poderem existir várias capacidades máximas em fluxo livre para um nó (depende do local da via). A sua determinação empírica acarreta um problema que tem que ver com a determinação da probabilidade P_{FS}^B associada à transição F-S. Para tal é necessário tomar em consideração várias realizações em que para os diferentes dias as condições de tráfego podem ser diferentes e, como seu viu, o caudal de descarga depende dos parâmetros de controlo. Para ultrapassar a dicotomia deve-se usar uma outra expressão para determinar a perda de capacidade da via, a qual é dada pela diferença entre o caudal de pré-descarga a o máximo caudal de descarga. Vem:

$$\delta q = q_{FS}^B - q_{out,\max}^B \quad (1.25)$$

Mas de um modo geral q_{FS}^B está associado à condição $P_{FS}^B < 1$ pelo que o valor pode ser bastante inferior à capacidade máxima que se pretende determinar.¹⁰ Assim, em certas situações pode ser preferível definir a diferença entre o caudal máximo empírico em F e o máximo caudal de descarga. Se assim for, tem-se para a Perda de Capacidade:

$$\delta q = q_{\max}^{free,emp} - q_{out,\max}^B \quad (1.26)$$

¹⁰ A transição entre as fases de Fluxo Livre e Fluxo Sincronizado no nó acontece para um caudal inferior ao valor determinístico. Na maioria das vezes o congestionamento aparece antes do fluxo atingir o valor em que a probabilidade da transição se dar é de 100%.

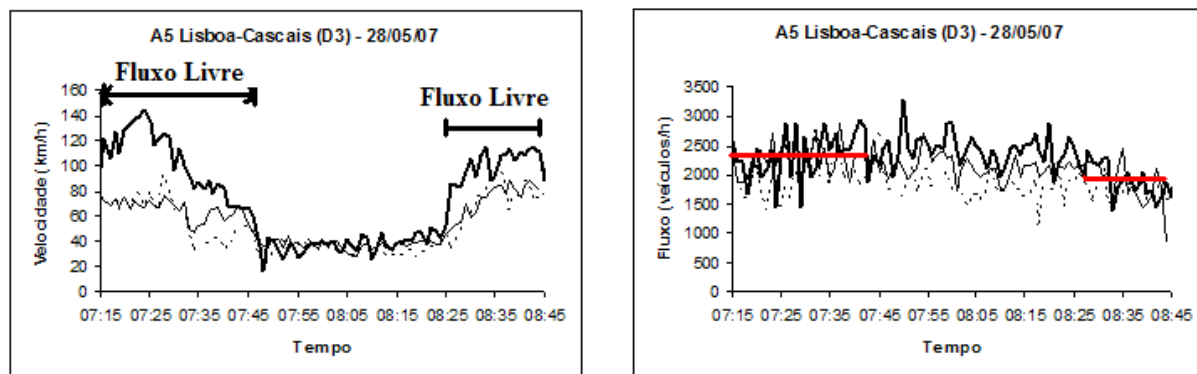


Figura 1.11 - Perda da capacidade da via que é dada pela diferença entre os limites do caudal médio do trânsito no nó antes e após o congestionamento

1.6. Características da via na formação de congestionamento

As características de uma auto-estrada têm um papel preponderante no aparecimento e evolução dos padrões de congestionamento que ocorrem na via. Como foi descrito em 1.1 e 1.5 existem diferentes tipos de padrões, designadamente SP's (LSP's, MSP's, WSP's ou ASP's) e GP's (GP do tipo 1, GP do tipo 2, DGP's ou AGP's).

O estudo destas estruturas pode tornar-se mais complexo se considerar-se a existência de nós adjacentes na via rodoviária. Nesta condição é preciso atentar nos efeitos que o padrão de congestionamento a jusante pode ter sobre o(s) nó(s) a montante, quer na emergência de novas estruturas ou na transformação dos padrões já existentes. Ou seja, é preciso analisar os efeitos da propagação de FWMJ's ou a ocorrência de transições F-S induzidas devido à propagação de WMJ's ou ao fenómeno *catch effect* associado à propagação de um SP.

Quando se avalia dois nós consecutivos é possível deparar com quatro casos distintos:

- Detecção de padrões de congestionamento distintos em várias partes da via;
- Formação de “GP's Espacialmente Separados” que emergem devido à propagação de FWMJ's¹¹;
- Constituição de um Padrão de Congestionamento Expandido (*Expanded Congested Pattern* ou EP), o qual acontece quando uma região de Fluxo Sincronizado afecta dois ou mais nós;
- Formação de um “GP Curto”, isto é, um GP que devido às particularidades da via aliadas

¹¹ É possível que em alguns nós se constituam SP's em vez de GP's.

ao caudal de entrada e sob a condição de forte congestionamento todas as NMJ's se dissolvem antes de darem lugar a WMJ's.

1.6.1. Nós adjacentes e padrões de Congestionamento Expandido

Embora um EP possa apresentar qualitativamente uma estrutura espaço-temporal similar a um GP, existem algumas peculiaridades que os distinguem. Primeiro, quando se trata de um EP a zona de Fluxo Sincronizado afecta dois ou mais nós consecutivos, donde o comprimento da zona de compressão pode ser bem maior do que no caso de um GP. Segundo, como a região de estrangulamento pode abranger vários nós adjacentes é possível haver a propagação de NMJ's entre estes sem que haja a sua transformação em WMJ's. Todavia, é igualmente possível o estabelecimento de várias zonas de compressão no interior do EP. Se assim for é natural que surjam várias FWMJ's no Congestionamento Expandido.

1.6.2. Nós desbloquantes

Numa auto-estrada não existem somente nós de congestionamento, isto é, nós responsáveis por uma transição de fases do sistema, sobretudo de Fluxo Livre para Fluxo Sincronizado. Existem também situações em que um nó pode provocar a redução do comprimento de uma Fila Móvel ou levar mesmo à sua extinção. Estamos perante um nó desbloquante do tráfego.

Empiricamente este tipo de nós está associado a troços em que há um aumento das faixas de rodagem a montante na via ou existe um rampa de saída na auto-estrada. Em ambos os casos a propagação da fila de congestionamento é afectada, mas se no primeiro caso é comum a fila desaparecer já no segundo caso dá-se a redução do seu comprimento na zona próxima do nó de saída, comprimento que volta a crescer mais adiante.

Porém, quando a faixa de rodagem associada à saída da auto-estrada é longa as NMJ's que se formaram na zona de estrangulamento podem mesmo desaparecer. A estrutura de congestionamento assemelha-se assim a um LSP, mas a sua origem deve-se exclusivamente às particularidades da via e não a qualquer efeito não-linear associado à propagação da onda. O padrão designa-se por *Shortened GP*.

1.7. Diagrama Fundamental Empírico

O Diagrama Fundamental Empírico é uma ferramenta essencial para análise das principais características médias do tráfego rodoviário. Como tal é muito utilizado em soluções já desenvolvidas para controlo do trânsito. Serve de base em muitas representações matemáticas que visam modelar o comportamento do trânsito e que são aplicadas nos actuais sistemas de controlo de tráfego rodoviário.

O Diagrama Fundamental Empírico é o plano $q(\rho)$ construído a partir dos conjuntos de valores medidos para o fluxo e densidade de veículos no troço em análise. As curvas que surgem nesse plano resultam da média das grandezas relacionadas (é feita a média para diferentes pontos de fluxo ou velocidade relativamente a um valor de densidade).

Além da relevância histórica da teoria baseada no Diagrama Fundamental na ciência do tráfego rodoviário, a teoria 3F também reconhece a importância do estudo da relação das grandezas densidade e caudal só que o faz no plano empírico. Este diagrama não exclui a existência da região 2D associada aos vários estados do sistema durante a fase de Fluxo Sincronizado. Recorde-se que, ao contrário da hipótese advogada pela teoria do Diagrama Fundamental em que todos os estados estacionários do trânsito se localizam sobre uma curva no plano $q(\rho)$, a teoria 3F defende que existe uma superfície onde os estados estacionários associados a um congestionamento se distribuem e tal deve-se às dinâmicas complexas dos efeitos espaço-temporais revelados pelas respectivas estruturas e transições do trânsito.

O Diagrama Fundamental Empírico comporta dois ramos, um associado à fase F e o outro associado à fase J. Esses ramos são as curvas F e J descritas anteriormente. A conjugação de ambos os ramos cria uma característica que pode assumir várias formas, dependendo do local estudado e do tipo de congestionamento. As mais comuns são a forma de U-invertido, V-invertido e λ -inverso.

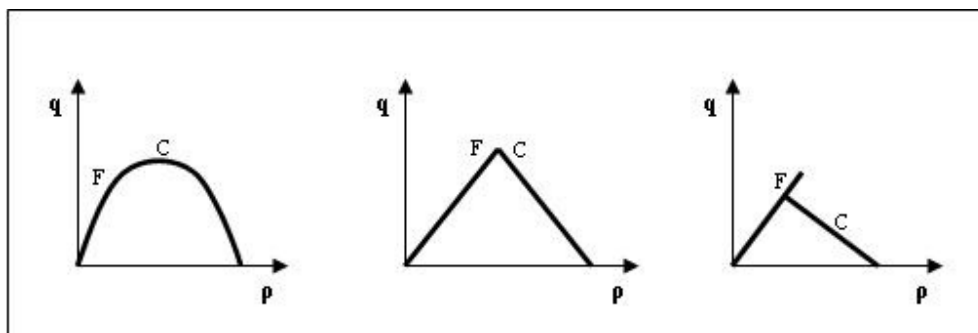


Figura 1.12 - Características típicas do Diagrama Fundamental Empírico, em forma de U-invertido, V-Invertido e Lambda-Inverso

Em [1] Kerner sublinha a correlação existente entre o Diagrama Fundamental Empírico e a estrutura espaço-temporal formada no congestionamento, bem como explica a razão de cada uma das formas. Todavia, alerta que essa correlação implica tomar como conjunto de dados apenas uma parcela de todos os valores medidos, uma vez que no mesmo dia da observação para o mesmo local podem ocorrer vários padrões de congestionamento. Assim, há um subconjunto de medições para cada tipo de padrão, sujeitas à média e consolidação para vários dias (as grandezas variam para os vários pontos espaciais do padrão).

O estudo dos pontos de Fluxo Sincronizado está relacionado com a curva J. Como se sabe o declive da “linha J” é a velocidade de propagação v_g da frente da onda de bloqueio. As coordenadas do extremo superior representam o caudal e densidade a jusante da frente e o mínimo é determinado pela intersecção com o eixo das abcissas (eixo das densidades) no qual se tem ($\rho_{\max}, v_{\min}=0$).

Sendo v_g um parâmetro característico, não depende das condições iniciais ou do caudal de entrada no troço, ou seja, a velocidade de propagação da frente da WMJ não depende do tempo. Logo, a recta J representa esse movimento estável da fila de congestionamento no plano $q(\rho)$.

É fácil assim estabelecer uma ligação entre os resultados empíricos apresentados no diagrama fundamental e a “linha J”. Basta ter em consideração que as medições são feitas em detectores que se encontram a jusante do congestionamento, na vizinhança do nó, e que o máximo da “linha J” nos dá o fluxo e densidade a jusante da frente da fila.

Se a jusante se tem a situação de Fluxo Livre, q_{out} e ρ_{\min} são parâmetros característicos, se pelo contrário o sistema se encontra a jusante na fase S o fluxo médio é inferior a q_{out} e a densidade é maior que ρ_{\min} . No entanto, qualquer ponto sobre a “linha J” representa os valores

médios das referidas grandezas a jusante da fila de congestionamento e, portanto, conduzem a um ponto empírico sobre a recta.

Quando a jusante da WMJ o trânsito está na fase de Fluxo Sincronizado, os valores de q e ρ podem ser díspares para diferentes Filas Móveis Longas, resultando em diversos pontos empíricos no diagrama. Contudo, esses pontos estão localizados sobre a “linha J” e fazem parte do mesmo diagrama, desde que se considere o mesmo local da via e os mesmos parâmetros de controlo. Uma sequência de Filas Móveis é típica em estruturas do tipo GP e EP. Assumindo que entre as Filas Móveis se tem a fase S e que existe um detector entre ambas, então é possível medir o caudal e densidade associados com o *outflow* da WMJ a montante do detector e, assim, obterem-se os valores médios empíricos utilizados no Diagrama Fundamental Empírico.

E quando, no GP, se tem um SP em que não existem WMJ's? Os valores médios podem não coincidir com a recta J, dependendo do valor da velocidade. No caso de forte congestionamento (velocidades baixas) é mais provável a formação inicial de um SP e, à posteriori, de uma WMJ's, donde os pontos sobre o diagrama fundamental devem tender assintoticamente para a “linha J”. No caso de fraco congestionamento as velocidades podem ser elevadas pelo que a curva formada pelos pontos empíricos vai divergir da “linha J”.

A curva designada por C, constituída pelos pontos empíricos associados ao Fluxo Sincronizado e WMJ, pode ultrapassar a recta J. Isto sucede para pontos do congestionamento (ex: padrão GP) onde se formam Filas Móveis, as quais podem ter uma velocidade de propagação mais negativa que v_g (por isso o declive negativo ser mais inclinado). Logo, o ramo C pode exibir diferenças qualitativas quando é construído com base em medições realizadas em ponto diferentes da estrutura de congestionamento. Esta dependência qualitativa do Diagrama Fundamental Empírico face às coordenadas espaciais resume-se:

Para velocidades elevadas em S, o ramo C apresenta declive positivo no plano $q(\rho)$ tal como o ramo F. Quanto mais a montante no congestionamento se realizar a medição, menor será o declive, pois menores serão as velocidades e, por conseguinte, a média para cada valor da densidade;

Nos pontos em que a velocidade média no congestionamento começa a decrescer, a curva C atinge o máximo (declive positivo para baixas densidades e negativo para as densidades mais elevadas);

No local onde se formam Filas Móveis no Fluxo Sincronizado (velocidades reduzidas), o

ramo C tende para a recta J;

No ponto onde se constituem as Filas Móveis Alargadas, C encontra-se sobre a “linha J” ou segue-a com um pequeno *offset*.

Prova-se que para densidades elevadas do trânsito existe uma forte correlação entre a “linha J” e o Diagrama Fundamental Empírico (exibe comportamento assíntótico).

Um aspecto que também se deve considerar relativamente ao diagrama fundamental empírico tem que ver com as características dos veículos e condutores. Embora possam não existir diferenças qualitativas, verifica-se que há mudanças quantitativas nas grandezas médias do trânsito. Naturalmente, as faixas mais à esquerda terão condutores com comportamento mais agressivo e poucos veículos pesados, enquanto na faixa da direita o comportamento dos condutores é mais uniforme e circulam com maior frequência veículos longos. Donde, constata-se que a inflexão no ramo C associada ao máximo é menos pronunciada (variações mais fortes das velocidades na faixa da esquerda tendem a ser compensadas por pequenas variações na faixa da direita); O caudal em Fluxo Livre pode não ser superior a q_{out} (fluxos diferentes para cada faixa) e o ramo C no ponto onde se formam WMJ’s pode estar ligeiramente acima da “linha J” (pode existir uma WMJ na faixa mais à esquerda e ainda persistirem NMJ’s nas faixas mais à direita).

Quanto à forma do diagrama fundamental empírico, definida a partir dos ramos F e C, é comum encontrar as características λ -inverso e V-invertido nas zonas da via a montante do nó de congestionamento onde se formam GP’s ou EP’s. λ -inverso corresponde aos casos em que o caudal máximo em Fluxo Livre é substancialmente superior ao fluxo a jusante do congestionamento:

$$q_{max}^{free} > q_{out}^{syn} \quad (1.27)$$

A maior contribuição para o traçado do ramo C provém dos fluxos a jusante das WMJ’s formadas no interior dos padrões, logo os valores experimentais médios encontram-se sobre a “linha J”.

A característica de V-invertido é similar no que concerne ao ramo C, mas no que respeita ao ramo F já não se verifica a condição do fluxo máximo ser consideravelmente superior ao fluxo de saída da onda de congestionamento, donde:

$$q_{\max}^{free} \approx q_{out}^{syn} \quad (1.28)$$

Como o padrão do tipo GP é o mais comum em nós associados a vias de acesso à auto-estrada e a condição acima é verificada, a característica de V-invertido é a predominante. Atente-se, no entanto, para o facto de em dias diferentes as características da fila de bloqueio, principalmente o parâmetro característico v_g poderem ser muito distintas (os parâmetros de controlo, como por exemplo as condições climáticas, variam facilmente de dia-para-dia).

Quando o fluxo de entrada no troço ou os caudais provenientes de nós adjacentes são elevados, caso dos padrões EP, o caudal no Fluxo Livre é superior ao caudal de saída da WMJ e, portanto, tem-se uma característica do tipo λ -invertido.

Por outro lado, se as medidas para o traçado do diagrama fundamental empírico são realizadas nas zonas de compressão dos GP's e EP's ir-se-á observar uma forma de U-invertido. Tal deve-se ao facto do intervalo central das densidades em trânsito congestionado no diagrama ser composto essencialmente por estados estáveis de Fluxo Sincronizado, os quais se podem encontrar acima da “linha J”.

2. ANÁLISE EMPIRICA

2.1. Especificação e pressupostos

O estudo realizado é feito com base na observação durante cinco dias úteis (28 de Maio de 2007 a 1 de Junho de 2007) do trânsito rodoviário no nó de ligação entre as auto-estradas A5 e A9, nos sentidos respectivamente de Lisboa-Cascais e Loures-Cascais. O nó analisado é o ponto de intersecção das duas vias, embora se considere que o trânsito oriundo da A9 está a entrar através da rampa de acesso na auto-estrada A5, a qual é vista como a via principal.

A rampa de acesso é formada apenas por uma faixa de rodagem e é estudada num comprimento de 500 m, com a existência de dois detectores, um localizado na zona imediatamente anterior à intersecção das vias e o outro a montante, em plena A9.

Já a via principal é composta por 3 detectores, o primeiro localizado no nó rodoviário, outro localizado 300 m a montante e, finalmente, um terceiro situado a 1 km da intersecção. Os detectores são numerados por ordem decrescente e estão associados a um conjunto de câmaras CCTV colocadas em luminárias das vias.

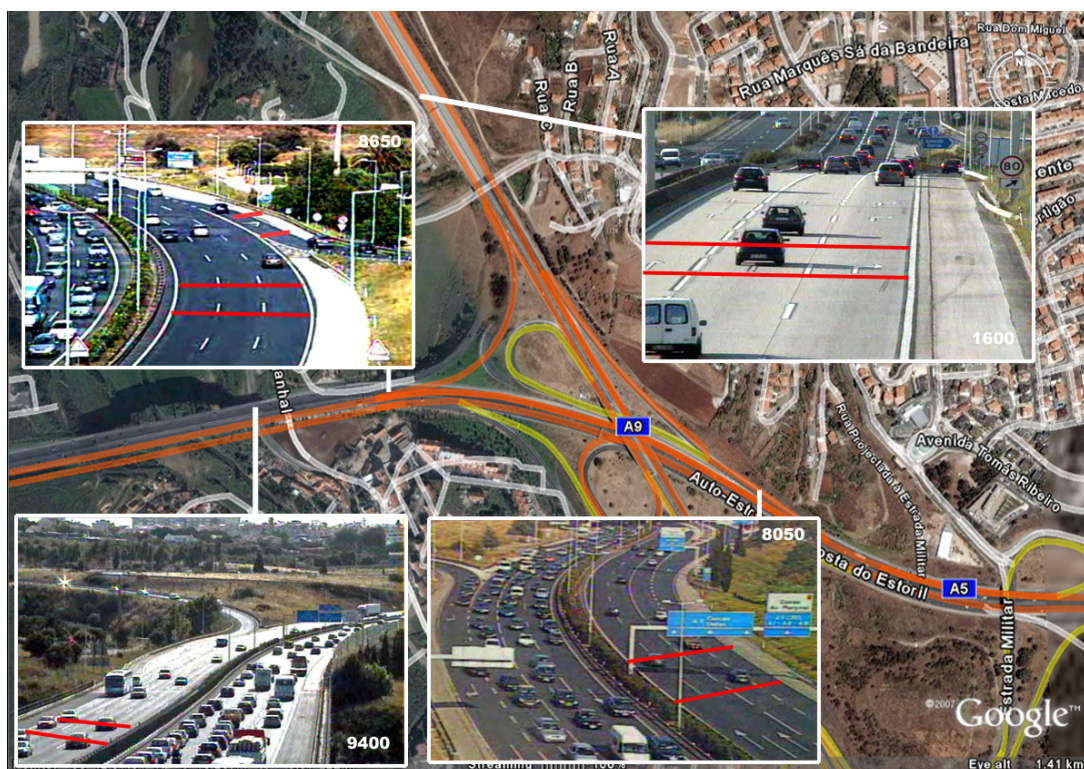


Figura 2.1 – Localização espacial dos detectores virtuais utilizados para realizar as medições da velocidade e caudal em cada uma das faixas de rodagem. Canto superior esquerdo refere-se ao detector D2, inferior detectores D3 (esquerda) e D1 (direita). No canto superior direito surge o detector D_{on-up}

| Designação | Código CCTV | Distância do nó (m) | Via |
|--------------------|-------------|---------------------|-----|
| D3 | 9-400 | 0 | A5 |
| D2 | 8-650 | 300 | A5 |
| D1 | 8-050 | 1000 | A5 |
| D _{on} | 8-650 | 0 | A9 |
| D _{on,up} | 1-600 | 500 | A9 |

Tabela 2.1– Detectores instalados nas vias para realização das medidas

A medição das velocidades dos veículos e do caudal das vias é feita com recurso a estes detectores e é realizada de forma indirecta. Parte-se da observação das imagens através de um leitor digital disponibilizado pela concessionária das auto-estradas¹² e utilizando uma aplicação em Java desenvolvida para o efeito¹³ recolhem-se as referidas medidas.

¹² As imagens estão codificadas num ficheiro proprietário com extensão .asf que só pode ser lido pelo leitor VisioWave® cedido pela Brisa – Autoestradas de Portugal S.A.

¹³ Imagens do aplicativo são apresentadas em anexo.

O programa *TrafficCalc.jar* é constituído por um relógio interno com uma resolução máxima de 200 milissegundos. O utilizador deve pressionar por duas vezes o teclado, uma a sinalizar a entrada de veículos e a segunda vez a saída. No segundo clique deve pressionar as teclas 1 a 5 para indicar a entrada de n veículos¹⁴. A aplicação guarda o número de passagem do veículo, a hora de início de travessia sobre o detector e a hora de fim de passagem. Note-se que o detector é virtual¹⁵ mas tenta emular o funcionamento de um detector indutivo, sensor habitualmente encontrado nas auto-estradas para a realização deste tipo de medições. Infelizmente, não existem *loops* indutivos nos troços em estudo e houve a necessidade de recorrer a esta técnica indirecta de medição.

Para além do erro sistemático resultante da resolução do cronómetro, acresce o erro aleatório associado ao tempo de reacção do utilizador decorrente entre o momento em que o veículo é detectado na imagem e o clique no teclado. Como erro aleatório também se pode mencionar aquele que resulta do clique inusitado do teclado ou da indicação de um número de veículos diferente daquele que na realidade atravessou a imagem. Esse erro tem maior probabilidade de ocorrer nas situações de tráfego congestionado, em que a densidade de veículos na via é mais elevada. Há ainda o erro sistemático que deriva da posição da câmara, a qual não se encontra num plano ortogonal. A visão da via é em perspectiva e a distância entre a câmara e o local observado é imprecisa.

Outro dos erros sistemáticos tem que ver com o facto de se assumir uma velocidade constante na viagem do veículo sobre o detector. Se com a via livre esse pressuposto pode ser considerado válido para elevadas densidades de tráfego a velocidade do veículo ao longo do detector pode variar. Atente-se que em situação de congestionamento os veículos mantêm distâncias inferiores entre eles e tendem a apresentar um comportamento oscilante, com momentos intercalados de pára-arranca. O comprimento do detector não é menosprezável, pois chega a atingir 28 m quando se tem um troço cujo distância é de 300 m.

¹⁴ Como se depreende no mínimo 1 e no máximo 5 veículos. Este valor foi definido tendo por base o facto do comprimento do detector ser aproximadamente de 28 m e se assumir que o veículo tem um comprimento até 5 m.

¹⁵ Foram arbitradas duas linhas imaginárias na via que delimitam a zona do detector, isto é, o seu comprimento.

| Tipo de erro | Acção de erro |
|--------------|---|
| Sistemático | Resolução do cronómetro |
| Sistemático | Discretização dos tempos |
| Sistemático | Arredondamento das estatísticas |
| Sistemático | Câmaras em perspectiva |
| Sistemático | Variação da velocidade sobre o detector |
| Aleatório | Tempo de reacção do utilizador |
| Aleatório | Sinalização do número de veículos |
| Aleatório | Falhas de vídeo |

Tabela 2.2 – Resumo de vários erros que afectam o processamento e análise dos dados

Os dados recolhidos pela aplicação são gravados num ficheiro de texto cujo nome é indicado pelo utilizador. Esse ficheiro de dados é carregado em Excel para processamento das restantes medidas indirectas, designadamente:

- Densidade instantânea (veículos/km);
- Intervalo de tempo entre dois veículos consecutivos (segundos);
- Distância entre veículos consecutivos (metros);
- Duração da passagem sobre o detector (segundos);
- Velocidade média (km.h^{-1});
- Caudal médio (veículos.s^{-1});
- Densidade média (veículos.km^{-1});
- Atraso médio entre veículos consecutivos (s);
- Distância média entre veículos consecutivos (m).

As estatísticas acima mencionadas são calculadas através de macros e rotinas em VBA existentes nos ficheiros Excel¹⁶. Os gráficos produzidos podem não utilizar todas as medidas, mas qualquer uma delas é útil na prossecução do estudo e, per si, não suficiente para uma correcta análise macroscópica do trânsito.

A observação do tráfego rodoviário decorreu entre os dias 28 de Maio de 2007 e 1 de Junho do mesmo ano. Durante esses cinco dias foram gravados em DVD os vídeos relativos à observação entre as 7h15m e as 8h45m. Esse período matinal foi identificado como sendo o intervalo de tempo em que se assistia à formação de trânsito congestionado no local de estudo.

Não foi possível realizar uma medição directa da evolução espacial do tráfego, pois não

¹⁶ Existe um ficheiro Excel associado às medições para cada dia. Esse ficheiro inclui uma página com os dados e respectivo tratamento por cada faixa de rodagem.

existiram meios para a monitorização individual dos veículos ao longo de todo o comprimento de via analisado. Por esse motivo não são apresentados gráficos espaço-temporais 3D que costumam surgir em alguns estudos similares.

Como o número de realizações é pequeno (estudo com uma curta janela temporal) face ao número de amostras commumente utilizado neste tipo de análises¹⁷ optou-se por não realizar qualquer avaliação probabilística. A Estatística Descritiva está na origem e desenvolvimento de modelos para simulação do trânsito, identificando, seguindo e prevendo a evolução dos padrões e explicando o comportamento do sistema. Todavia, o presente trabalho tem como enfoque identificar e caracterizar - do ponto de vista macroscópico - a evolução do trânsito no nó de uma auto-estrada e não necessita por conseguinte de ter um carácter preditivo. Pretende-se apenas compreender a evolução do trânsito no local e tempo circunscritos e daí tentar identificar um padrão. A partir daí será possível adoptar uma estratégia que permita um controlo optimizado do nó, sem entrar em inferências estatísticas associadas à teoria dos grandes números.

Embora no período da experiência não tenha havido grandes alterações nas variáveis de controlo (condições climatéricas, procura da via, tipo de veículo ou obras no traçado), ocorreram acidentes que causam perturbações aleatórias no funcionamento quotidiano das vias.

A auto-estrada A5 tem no segmento de via estudado mais de um nó físico. Além do nó do ponto de reunião entre a A9 e a A5 na direcção Cascais, existe a montante uma rampa de saída. Contudo, a percentagem de veículos que abandona a A5 na bifurcação é inferior a 10% do número de veículos que circulam na via em estudo. O efeito deste nó na evolução dos padrões de congestionamento é considerado, portanto, como tendo pouco impacto, quer na onda que se forma na A5 quer no congestionamento que se constitui na A9 e a análise da formação, evolução e transformação destes padrões baseia-se exclusivamente na intersecção entre a via de acesso e a via principal.

A avaliação qualitativa do trânsito é baseada na média dos valores instantâneos de cada uma das grandezas (velocidade, caudal, densidade, espaçamento entre veículos). Como não se pretende fazer uma análise microscópica do trânsito, em que é necessário analisar individualmente cada veículo, assume-se um tempo para a média T_{av} de 1 minuto. A utilização

¹⁷ Estudos empíricos do trânsito realizados em auto-estradas europeias e norte-americanas tiveram um período de observação de um ano com a recolha diária de dados.

de tempos médios realça determinados efeitos do trânsito, características dos padrões de congestionamento e facilita a sua identificação. Por outro lado filtra muitos dos efeitos associados ao comportamento dos condutores que são estudados através de uma análise microscópica. Todavia, o tempo adoptado para a média é suficientemente pequeno para não suprimir as propriedades empíricas do fluxo rodoviário que se pretendem estudar.

2.2. Metodologia

A análise empírica da evolução espaço-temporal do tráfego rodoviário assenta nas seguintes etapas:

- Determinação dos nós físicos no segmento de estrada observado (rampas de acesso, rampas de saída, diminuição do número de faixas de rodagem,...);
- Verificação dos nós físicos que provocam o estrangulamento do trânsito;
- Definição dos nós efectivos de estrangulamento, isto é, aqueles que durante o período de estudo originam sistematicamente o congestionamento de veículos;
- Estabelecimento do local efectivo do nó, ou seja, do ponto espacial onde se forma a frente de onda de congestionamento;
- Registo do tempo durante o qual há interrupção no trânsito (duração da transição F-S);
- Extração de características do sistema no nó antes e após a perturbação do trânsito, designadamente o fluxo máximo livre q_{\max}^{free} , o fluxo de pré-descarga $q_{\text{FS}}^{(B)}$, o caudal médio durante o congestionamento q^{syn} , o caudal de descarga q_{out}^B , a velocidade máxima em fluxo livre v_{\max}^{free} , a velocidade média no interior do congestionamento v^{syn} , as capacidades máxima e mínima do nó q_{\max}^B e q_{\min}^B ;
- Comparação entre os vários detectores do andamento temporal da velocidade, caudal e densidade, bem como do diagrama fundamental empírico. Determinação do tipo de padrão de congestionamento através do relacionamento efectuado;
- Verificação da ocorrência de transições S-J e se estas são espontâneas ou induzidas;
- No caso do ponto acima se verificar, calcular as variáveis características como a velocidade de propagação da fila móvel longa v_g , o caudal médio no seu interior q_{\min} , o caudal de saída q_{out} e a sua frequência/período durante a fase WMJ;
- Determinar a existência do efeito de compressão do trânsito e se este acontecer definir o

valor limite q_{lim}^{pinch} , a velocidade de propagação da fila móvel curta v_{narrow} , a frequência e o período dessas ondas f_{narrow} e T_{narrow} ou a função de correlação R_{VV} das velocidades durante um padrão do tipo GP;

- Registo do intervalo de tempo que perdura cada uma das fases do sistema¹⁸;
- Justificar a presença de congestionamento fraco ou intenso, recorrendo se necessário às variáveis q_{sum} (procura da via ou fluxo de entrada¹⁹) e q_{out}^B ou ao diagrama de congestionamentos $q_{in}(q_{on})$;
- Identificação e compreensão de fenómenos dinâmicos do sistema²⁰ que podem conduzir a transformações ao longo do tempo nos padrões de trânsito;
- Descrição do efeito de perda de capacidade da via ou *capacity drop* δ_q e capacidade mínima do nó q_C com a via desbloqueada.

Embora a metodologia exposta possa ser alargada para incorporar outras técnicas que permitem uma avaliação mais exaustiva do comportamento do fluxo rodoviário, a falta de recursos para a aplicação dessas técnicas ou a relação custo/benefício fizeram que não viessem a integrar o quadro de trabalho²¹.

As grandezas que surgem com os sufixos *min* ou *max* dizem respeito, respectivamente, a valores mínimos e máximos. As medidas associadas às transições são os valores no ponto e as relativas aos congestionamentos são médias.

O comprimento da onda de congestionamento L_{syn} é um valor aproximado e é determinado através da observação. Sabendo a distância entre os detectores e a localização da frente e da cauda da onda facilmente se determina esse valor. Mesmo que as zonas fronteiras não se encontram situadas exactamente sobre o detector, a observação das imagens permite melhorar a precisão do local²².

Técnica similar é aplicada para calcular a velocidade de propagação da onda v_{up} . Se a cauda de onda é identificável entre dois detectores, basta aplicar a distância entre eles sobre o tempo

¹⁸ Momento associado às transições F-S, S-J, J-S e S-F.

¹⁹ q_{sum} é dado pela soma algébrica dos fluxos na via principal e rampa de acesso, logo $q_{sum} = q_{in+qon}$.

²⁰ Fenómeno de histerese, adaptação de velocidades, deslocação espacial da frente de onda na fase de fluxo sincronizado, dispersão, saturação ou meta-estabilidade.

²¹ Técnicas probabilísticas não foram aportadas devido ao baixo número de observações realizadas.

²² Conhece-se a distância entre as marcas horizontais da via que servem de pontos de referência.

que a cauda demora a percorrer esse percurso para se obter essa velocidade. O mesmo raciocínio é utilizado para determinar a velocidade de propagação da frente de onda v_{down} quando esta não está fixa. Recorde-se que nos casos de uma onda móvel MSP ou de uma fila alargada WMJ estas frentes propagam-se ao longo da via²³.

2.3. Resultados

2.3.1. 28 de Maio de 2007

Entre as 07h46m e as 08h24m há a formação de congestionamento na A5, no sentido Lisboa-Cascais, cuja localização espacial da frente corresponde à zona de reunião com a rampa de acesso. O intervalo de tempo associado à mudança entre fluxo livre e sincronizado é de cerca de 2 minutos, valor idêntico quando se dá a reversão de fases do sistema.

Forma-se uma padrão localizado entre o nó de estudo e a “Saída 6”. O seu comprimento L_{syn} é de aproximadamente de 400 m e não varia significativamente durante o período de congestionamento.

Quanto à velocidade de propagação da onda é aproximadamente $v_{\text{up}} \approx -18$ km/h. O sinal negativo aparece porque o sentido de propagação da onda é contrário ao sentido do fluxo rodoviário.

As curtas depressões que surgem entre as 08h01m-08h07m e as 08h38-08h40m no detector D1 resultam da elevada velocidade de circulação e fluxo nas faixas esquerda e central. A aproximação de uma zona com maior densidade de veículos e onde as velocidades são inferiores leva a uma travagem mais acentuada por parte dos condutores, o que cria momentaneamente uma perturbação de elevada amplitude.

²³ A velocidade de propagação da frente de onda de uma WMJ é um parâmetro característico, ou seja, reproduzível e constante. Mantém-se ao longo da via e é similar em diferentes dias. Não se altera com a passagem por vários nós que possam existir no segmento de via em estudo. Esta velocidade é identificada pela acrónimo v_g .

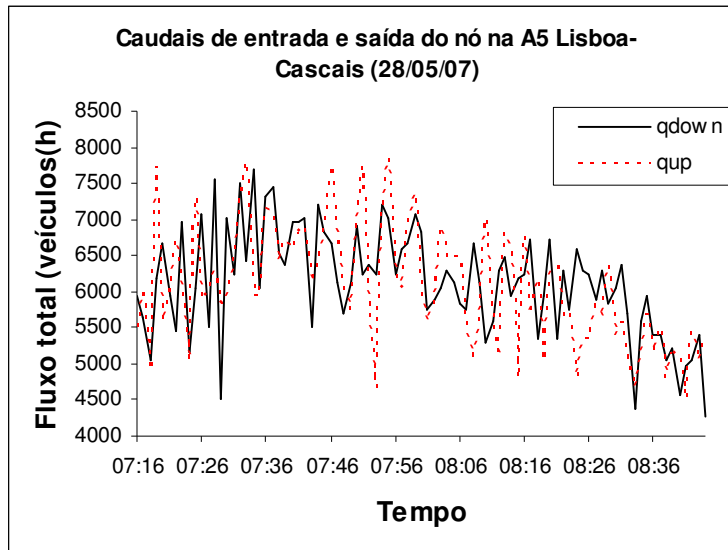


Figura 2.2 – Comparativo entre os caudais de saída e de entrada na via

Todavia, como o fluxo de descarga no troço a jusante é superior ao fluxo de entrada neste detector não se forma um congestionamento permanente na via. Recorde-se que no período em que a procura da via q_{in} é superior ao caudal de saída q_{out}^B pode dar-se uma mudança de fases do sistema desde que o fluxo seja superior à capacidade máxima do nó, a qual é dada pelo caudal máximo em fluxo livre q_{max}^{free} . Ora, essa capacidade difere dia-a-dia em função da procura da via, do fluxo oriundo da rampa de acesso ou mesmo do período de tempo associado à consolidação dos dados T_{av} . Logo, o valor empírico obtido é apenas uma possibilidade, sendo necessária uma análise probabilística da transição F-S (P_{FS}^B) em função da procura da via para se poder obter as condições em que $P_{FS}^B(q_{on}, q_{in})=1$ ou $P_C^B(q_{on}, q_{in})=0$ ²⁴.

Embora em certos instantes $q_{in} > q_{out}^B$, a Figura 2.2 revela um valor de q_{in} abaixo daqueles em que se dá a transição F-S. A capacidade do nó é suficiente para satisfazer a procura.

²⁴ Existem várias capacidades máximas conforme o dia e hora escolhidos e a função $q_C^B(q_{on}, q_{in})$. A condição $P_{FS}^B=1$ quer dizer que há 100% de probabilidade de ocorrer uma transição F-S e a condição $P_C^B=0$ de modo similar indica que a probabilidade da via se manter na fase de fluxo livre é nula (capacidade do nó atingida). A concretização de uma destas condições exige um elevado número de experiências.

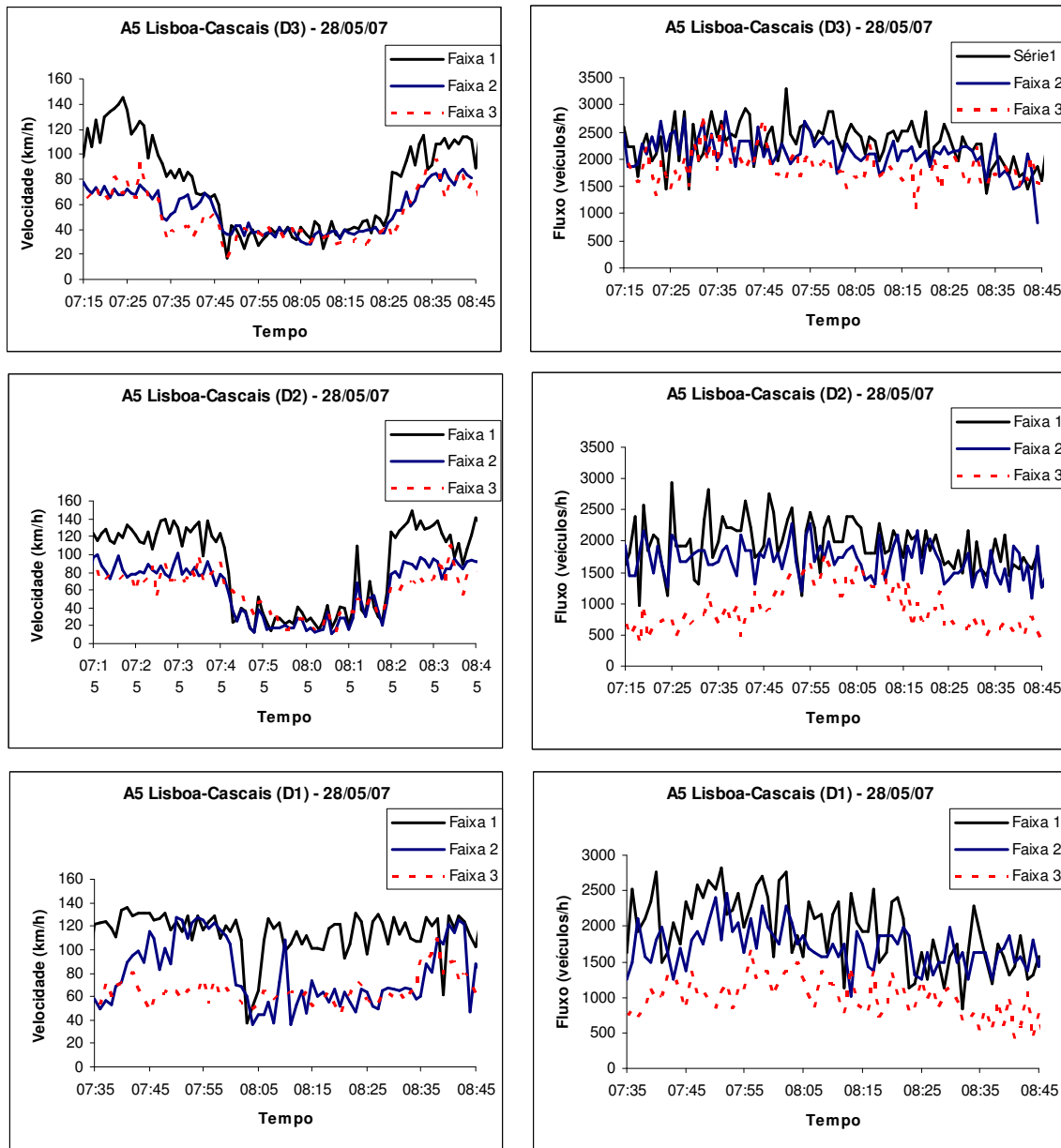


Figura 2.3 – Evolução temporal da velocidade e fluxo

A partir da Figura 2.3 é possível identificar os valores de pré-descarga q_{FS}^B e descarga q_{out}^B do congestionamento nesse dia. Estes são concordantes com os resultados empíricos apresentados na secção 1.5. Como é expectável o caudal de descarga, isto é, o fluxo de veículos a jusante do nó após o congestionamento (na fase de fluxo livre), é inferior ao caudal de pré-descarga, o qual precede imediatamente o momento da disrupção do tráfego. Sinal de perda de capacidade com o estabelecimento da velocidade e caudal inferiores ao estado inicial do sistema.

Na realidade, esta perda de capacidade está relacionada com o efeito de histerese do trânsito que se dá entre as transições F-S e S-F. Quantificando essa perda tem-se

$$\partial q = q_{\max}^{\text{free}} - q_{\text{out}}^B = 7080 - 5533 = 1547 \text{ [veículos/h]} \quad (2.1)$$

Ora, esta perda é significativa basta atentar no valor relativo do caudal de descarga face ao caudal máximo empírico durante a fase de via livre. O resultado obtido está muito próximo do valor avançado por Kerner em (1.11):

$$\frac{q_{\max}^{\text{free}}}{q_{\text{out}}^B} \approx 1,3 \quad (2.2)$$

Durante o congestionamento o caudal médio mantém-se elevado, mas a velocidade na zona de congestão é bastante inferior à velocidade praticada pelos condutores com a via livre. Na perturbação a velocidade cai para próximo dos 40 km/h o que configura uma zona de compressão do trânsito.

Embora se dê um efeito de compressão do trânsito, não se estabelece um padrão do tipo GP normalmente associado a esse fenómeno. Tal não acontece porque as oscilações no congestionamento têm uma amplitude baixa relativamente à amplitude crítica (estado de meta-estabilidade do sistema), ou seja, as sobre-acelerações ou travagens bruscas dos condutores não provocam perturbações no padrão suficientemente elevadas para originar o aparecimento de uma ou várias WMJ.

| Detector | T _{FS} | T _{SF} | t _{FS} (min) | t _{SF} (min) |
|----------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| D3 | 7h46m | 08h24m | 2 | 2 |
| D2 | 7h47m | 08:23m | 2 | 2 |
| D1 | - | - | - | - |

Tabela 2.3 – Tempos associados à disrupção da velocidade de circulação na A5. t_{FS} e t_{SF} são a duração para se formar ou dissolver o congestionamento

| q _{FS} ^(B) (veic./h) | q _{out} ^B (veic./h) | q _{max} ^{free} (veic./h) | q _{syn} (veic./h) | v _{max} ^{free} (km/h) | v ^{syn} (km/h) |
|---|--|---|-------------------------------|--|-------------------------|
| 6240 | 5533 | 7080 | 6347 | 145 | 39 |

Tabela 2.4– Resumo dos caudais e velocidade na A5 antes, durante e após o congestionamento do nó rodoviário

Da Tabela 2.4 pode-se concluir que o fluxo rodoviário permanece elevado mesmo durante o congestionamento, com valores próximos da situação de via livre. Configura um cenário de congestionamento fraco, comprovando porque não há formação de filas móveis na via.

O sistema encontra-se por conseguinte na fase de fluxo sincronizado e, embora de forma menos vincada, dá-se o efeito de adaptação das velocidades. Há o sincronismo de velocidades entre os veículos que circulam nas faixas esquerda e central durante o período de congestionamento como mostra a Figura 2.4. Como os veículos com a via livre podem ultrapassar pela esquerda a diferença de velocidades acentua-se.

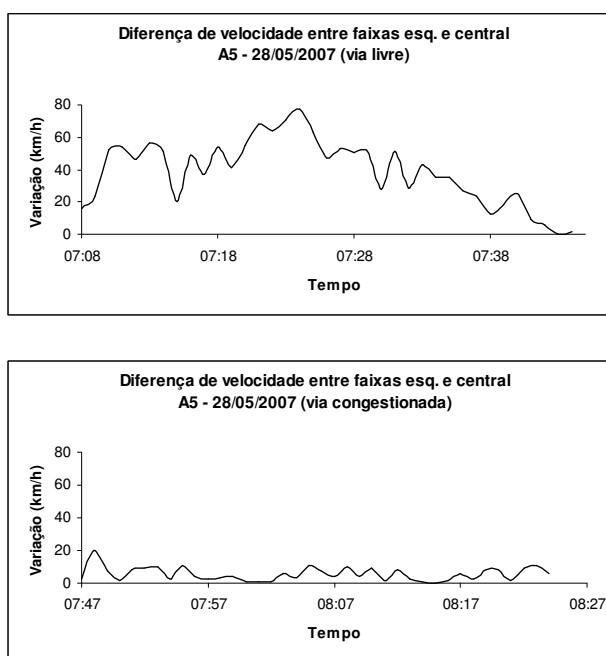


Figura 2.4 – Diferença de velocidades com a via desbloqueada e congestionada

Este efeito de adaptação também é evidente durante o congestionamento se se considerar a diferença de velocidades entre os veículos que circulam na mesma faixa. Atente-se na Figura 2.5.

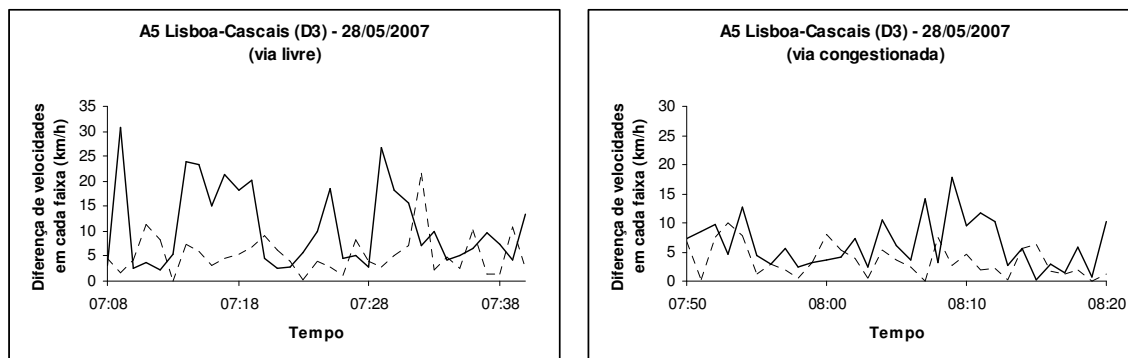


Figura 2.5 – Diferença de velocidades entre veículos consecutivos que circulam na mesma faixa de rodagem. Faixas esquerda a traço contínuo e central a tracejado

Naturalmente, como a faixa central apresenta uma maior densidade de veículos a amplitude da diferença de velocidades é menor. O efeito de sincronismo é mais pronunciado nesta faixa de rodagem. Em fluxo livre não existe uma correlação forte como acontece em fluxo sincronizado.

A Figura 2.6 demonstra como durante o congestionamento da via há um efeito de sincronismo das velocidades entre as faixas de rodagem, pois a possibilidade de ultrapassar é menor. Quando a via se encontra desbloqueada, os veículos utilizam a faixa da esquerda para ultrapassar. Como praticam velocidades superiores a distância que mantêm entre eles é maior (menor densidade).

Ao longo do tempo em que dura o congestionamento constata-se um efeito de dispersão. Os veículos tendem a distribuir-se pelas várias faixas de rodagem e é por isso que a maioria dos pontos associados a ambas as faixas estão concentrados nos valores medianos de densidade 45 a 70 veículos/km.

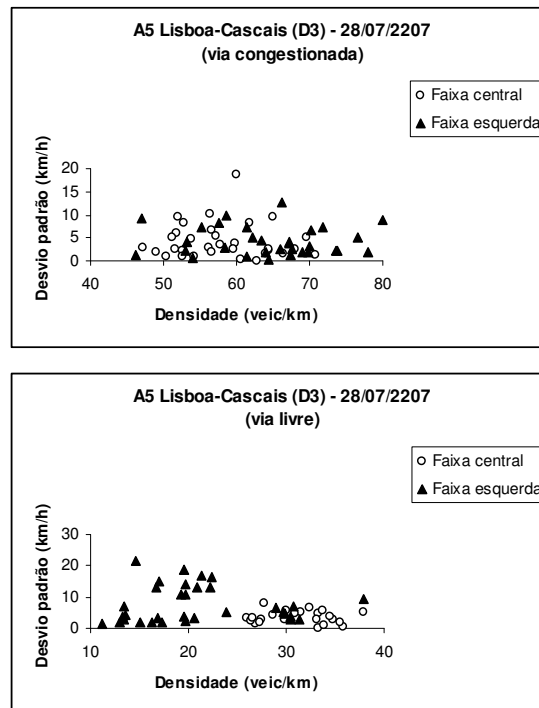


Figura 2.6 – Diferença de velocidade entre pelotões consecutivos de veículos para ambas as faixas de rodagem durante a fase de fluxo livre e congestionado

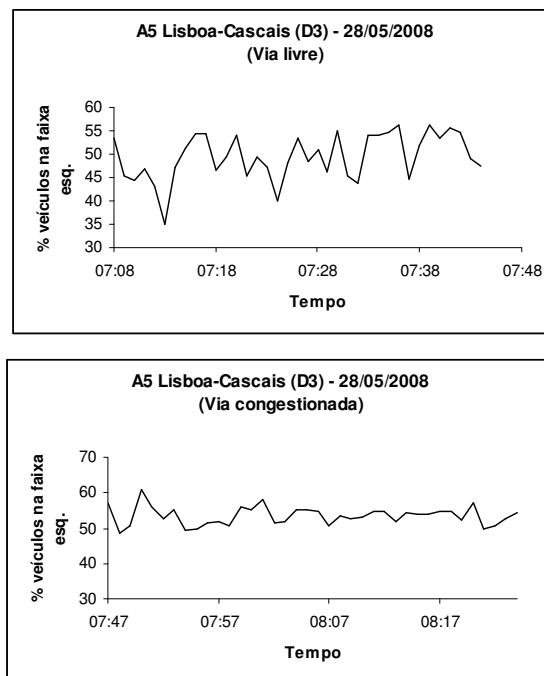


Figura 2.7 – Distribuição dos veículos pelas faixas esquerda e central durante os períodos em que a estrada se encontra livre e bloqueada

Durante o congestionamento os condutores tendem a reduzir a distância média que os separa do veículo da frente. Há uma maior optimização do espaço da via, chegando no período de observação em causa a distância mínima entre viaturas a ser de 8 m. A distância aumenta linearmente com a velocidade praticada. À velocidade livre legal (120 km/h) atinge-se o ponto de saturação. A partir daí os condutores tendem a manter uma distância de segurança de aproximadamente 100 m. A existência de pontos em que para a mesma distância existem várias velocidades comprova a hipótese fundamental da teoria de Kerner²⁵. O contrário também é válido, ou seja, verifica-se que para a mesma velocidade podem existir várias distâncias. A amplitude máxima do intervalo em que varia a distância para uma dada velocidade é neste dia de 5 m.

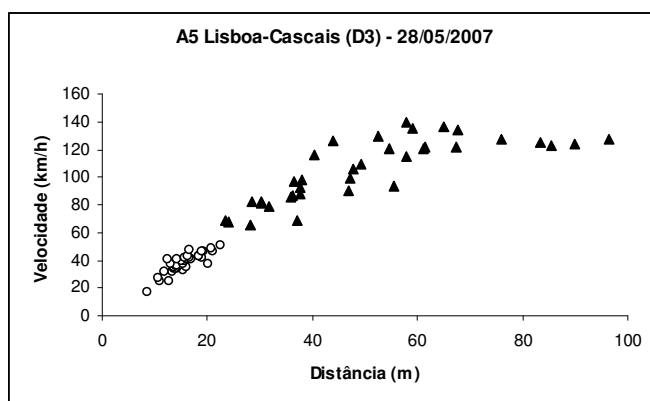


Figura 2.8 – Distribuição das velocidades em função da distância média entre veículos na situação de via livre (triângulos) e de via congestionada (círculos). O diagrama tem por base os dados relativos à faixa esquerda

²⁵ São designados por estados estacionários de velocidade, independentes do tempo, e que cobrem uma região no diagrama fundamental empírico.

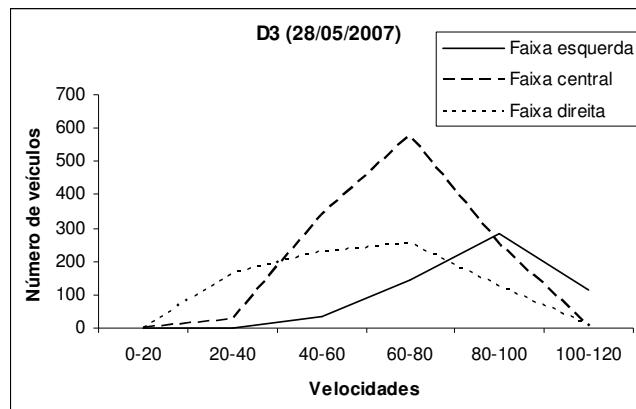


Figura 2.9 – Frequências absolutas para cada classe de velocidade praticada em cada uma das faixas de rodagem

A hipótese fundamental da teoria de Kerner assenta no princípio de que os condutores tendem a adaptar a velocidade face ao veículo que os precede. Acima de uma distância de segurança (envolvente inferior no diagrama fundamental) os condutores não estão tão preocupados com o espaço que os separa do veículo da frente mas sim em manter uma velocidade constante. Assim, verifica-se que num determinado intervalo espacial (*space gap*) podem existir várias velocidades (sobreposição de velocidades). Isso é verificado empiricamente inclusivé com a sobreposição de estados de fluxo livre e fluxo sincronizado (o mesmo valor de densidade para diferentes velocidades). A adaptação de velocidades está associada a estados estáveis em fluxo sincronizado do trânsito, isto é, existe independência temporal da velocidade. Como pode haver uma multitude de valores de densidade para a mesma velocidade durante a fase de fluxo sincronizado, esta traduz-se por um região de estados no diagrama fundamental empírico.

As pequenas oscilações na densidade/fluxo que se observam nos estados estacionários de velocidade estão associadas às acelerações e desacelerações por parte dos condutores por forma a manterem a distância de sincronismo. Quando o sistema se encontra num destes estados, as perturbações acima referidas não crescem e portanto não há a emergência de uma fila móvel longa.

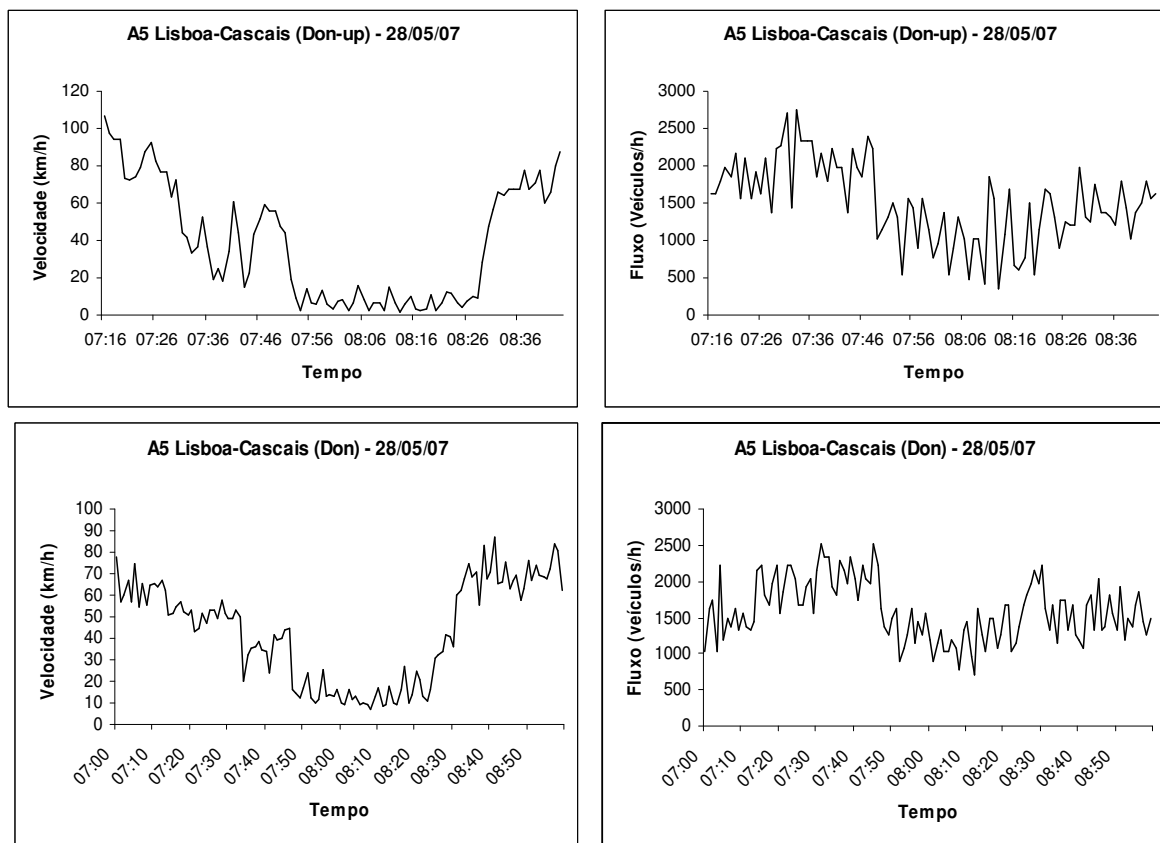


Figura 2.10 – Evolução temporal da velocidade e caudal na rampa de acesso da A9 para a A5, sentido Lisboa-Cascais. Situação no ponto de convergência e no troço imediatamente a montante

Como mostra a figura a rampa de acesso também se encontra congestionada devido à presença do nó na rede a partir das 7h12m e, por volta, das 7h45m dá-se o efeito de compressão do trânsito (situação de estrangulamento com pára-arranque). Todavia, a procura da via de acesso por parte de veículos oriundos da A9 no intervalo de tempo que dura o efeito de núcleo não é suficientemente elevada para provocar o aparecimento de WMJ. Formam-se filas móveis curtas na zona de compressão, mas a amplitude das oscilações não atinge o valor crítico que leve à constituição de ondas móveis longas.

As perturbações que se assiste durante o período de compressão do tráfego estão relacionadas com a sobre-aceleração dos veículos na frente de onda, a qual está localizada no nó rodoviário (veículos saem de uma situação em que se encontram quase parados e aceleram para entrar na A5).

A dissolução do congestionamento inicia-se pelas 8h33m a montante do nó e atinge a intersecção passado 1 minuto, repondo deste modo a fase de fluxo livre nesta via. Sabendo que a

distância entre detectores é aproximadamente de 500 m, a velocidade de propagação dessa onda é de 30 km/h (neste caso de sinal positivo porque se propaga no sentido do fluxo de tráfego).

| $T_{on,FS}$ | $T_{on,SF}$ | $\tau_{on,FS}$ (min) | $\tau_{on,SF}$ (min) |
|-------------|-------------|----------------------|----------------------|
| 7h12m | 8h23 | 2 | 9 |

Tabela 2.5 – Instantes associados ao início e fim do congestionamento e tempo médio da transição de fases do sistema

A capacidade do nó para manter o fluxo livre é de 900 veículos/hora que resulta de

$$q_C = q_{\max}^{free,on} - q_{FS}^{B,on} = 2220 - 1320 = 900 \text{ [veículos/h]} \quad (2.3)$$

A perda de capacidade da via de acesso devido ao congestionamento é de

$$\delta_q = q_{\max}^{free,on} - q_{out}^{B,on} = 2220 - 1440 \approx 745 \text{ [veículos/h]} \quad (2.4)$$

| $v_{on,max}^{free}$ (km/h) | v_{on}^{pinch} (km/h) | $q_{on,FS}$ (veic/h) | $q_{on,out}^B$ (veic/h) | $q_{on,max}^{free}$ (veic/h) | q_{on}^{pinch} (veic/h) |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 67 | 20 | 1320 | 1440 | 2220 | 1245 |

Tabela 2.6 – Valores característicos da velocidade e fluxo na rampa de acesso a 28/05/2007

Durante a compressão do trânsito, quer o caudal médio quer a densidade média apresentam valores elevados ($\rho_{on}^{pinch} = 95$ veículos/km). Estes são responsáveis pela velocidade reduzida e a aglomeração de veículos. Todavia, a procura da via apresenta um valor inferior, o que, aliado ao facto de haver uma maior densidade de veículos a montante na A9, permite a redução da zona de compressão e a sua dissolução de forma gradual. A diferença de caudais não é muito significativa, portanto o bloqueio permanece na rampa durante um tempo considerável (1/3 do tempo de observação). Atenta-se na Tabela 2.7 :

| q_{on-up}^{pinch} (veic/h) | ρ_{on-up}^{pinch} (veic/h) | T_{pinch} | τ_{pinch} (minutos) |
|------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------------------|
| 1095 | 111 | 07:49-08:23 | 34 |

Tabela 2.7 –Caudal e densidade na A9 a montante da intersecção. Período do estrangulamento rodoviário e tempo médio de duração.

O diagrama fundamental empírico para a via de acesso tem uma forma de λ -inverso,

característica de nós na rede desta natureza. O gráfico Figura 2.11 permite comprovar que até um limite (no caso de 2220 veículos/h) a densidade tem uma correlação linear com o fluxo. Consoante aumenta o caudal/velocidade na via, a densidade cresce igualmente. Todavia, atingida a capacidade máxima da via a relação entre as variáveis deixa de ser linear. Existe uma região que engloba os vários estados possíveis de congestionamento, isto é, para a mesma velocidade na via é possível existirem várias distâncias entre veículos e vice-versa. Se se desenhasse o contorno superior da região este estaria associado a estados de congestionamento em que os veículos mantêm a maior distância possível de sincronismo. Os contornos inferior e superiores estão ligados às distâncias de sincronismo que os condutores julgam necessárias para evitar colisões. Quando o trânsito é mais intenso a distância entre veículos é inferior, chegando ao valor mínimo na fase de WMJ. Há grande densidade de viaturas na via e os condutores mantêm o menor espaço possível para que não ocorra um acidente. A distância de sincronismo aumenta para cenários de fraco congestionamento, onde é possível praticar velocidades mais altas.

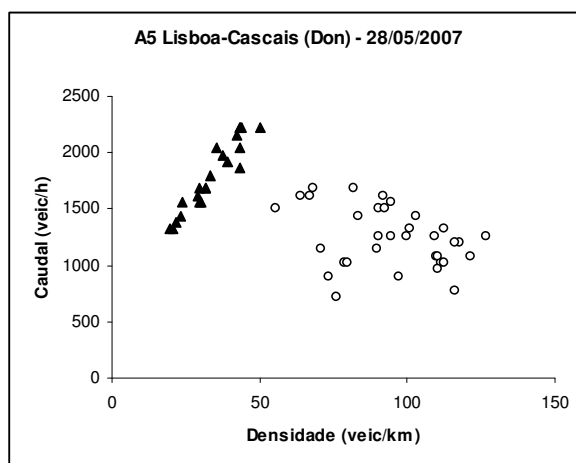


Figura 2.11 – Diagrama fundamental empírico para a faixa esquerda da via. Característica em forma de λ inverso

2.3.2. 29 de Maio de 2007

Tal como no dia anterior o trânsito na A5 volta a apresentar o mesmo comportamento. Há a formação de congestionamento entre as 7h38m e as 8h29m, ou seja, no período em observação o fluxo de trânsito encontra-se condicionado durante 51 minutos, o que representa mais de 2/3 do tempo de recolha de dados e é superior ao valor obtido no dia antes.

Existe uma transformação do padrão entre as 8h10m e as 8h23m que se deve à procura na A5 q_{in} ser abaixo do fluxo q_{on} verificado na rampa de acesso. Há uma redução temporária do caudal médio na A5, logo o número inferior de veículos a convergirem para a zona de intersecção pela via principal permite que um maior número de veículos oriundos da A9 possam entrar. Assim, há um desbloqueamento do nó e os veículos que se encontram na frente de onda de congestionamento podem acelerar, contribuindo para a dissolução da estrutura. O sistema transita temporariamente para a fase de fluxo livre, que não se mantém porque a procura da via volta a aumentar passados alguns minutos. Confronte-se o andamento temporal de ambos os caudais na Figura 2.12 onde no referido período $q_{in} < q_{on}$.

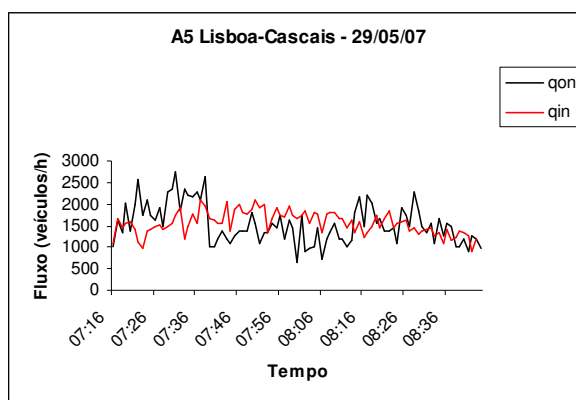


Figura 2.12 – Comparação entre os caudais q_{in} (fluxo total a montante do nó na A5) e q_{on} (fluxo na rampa de acesso que dá conta dos veículos que pretendem entrar na A5)

De resto, o padrão de congestionamento é, à imagem da estrutura de 28 de Maio de 2007, uma onda de congestionamento espacialmente localizada. Está circunscrita entre o detector situado no nó da rede (D3) e o detector imediatamente a montante (D2).

Pela visualização das imagens a com o conhecimento da distância entre os sensores é possível aferir um valor aproximado para o comprimento da onda de congestionamento. Enquanto durou o condicionamento na via a estrutura oscilou entre os 300 e os 400 metros.

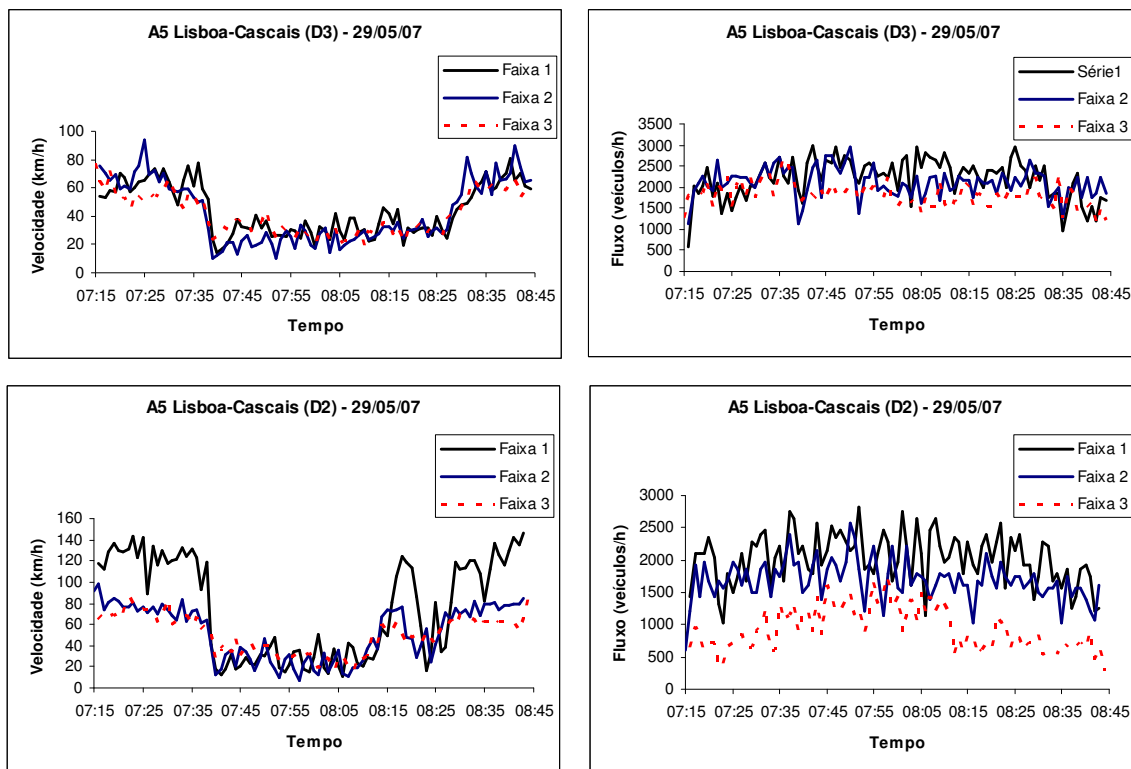


Figura 2.13 – Evolução temporal da velocidade e fluxo

Neste dia o congestionamento aparece 8 minutos mais cedo, às 7h38m. Contudo, a transição de fases é mais longa e demora aproximadamente 3 minutos até o sistema atingir o fluxo sincronizado (pelas 7h41m). Como acima já foi mencionado o retorno ao fluxo livre inicia-se pelas 8h29m, mas só se efectiva pelas 8h31m, 2 minutos depois tal como no dia antes (efeito de histerese).

| Detector | T _{FS} | T _{SF} | t _{FS} (min) | t _{SF} (min) |
|----------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| D3 | 7h38m | 08h29m | 3 | 2 |

Tabela 2.8 – Tempos da formação e dissipação do congestionamento na A5. Durações médias da transição de fases do sistema

Tal como na via principal aparece na rampa de acesso uma estrutura de congestionamento do tipo LSP. Embora apresente características de um GP - padrão que é típico em nós de intersecção e que além do fase de fluxo sincronizado é composto por filas móveis longas - a estrutura em causa não pode ser assim classificada. Entre as propriedades que se podem encontrar na fase de

WMJ e que são identificáveis na estrutura analisada, há uma queda abrupta da velocidade quando o sistema já se encontra em fluxo sincronizado devido à zona de compressão, a qual é acompanhada por uma queda igualmente acentuada do caudal de trânsito. A partir daí a velocidade média dos veículos é muito baixa, estando as viaturas quase paradas na via. Além disso, esta onda apresenta uma velocidade de propagação constante no trecho de via analisado ($\approx -10 \text{ km/h}$).²⁶

Todavia, não se trata de uma WMJ pois a sua frente permanece fixa como acontece na fase de fluxo sincronizado. Devido à compressão no nó surjam apenas duas ondas móveis curtas, as quais acabam por se fundir numa só devido à densidade de trânsito ser superior no troço a montante.

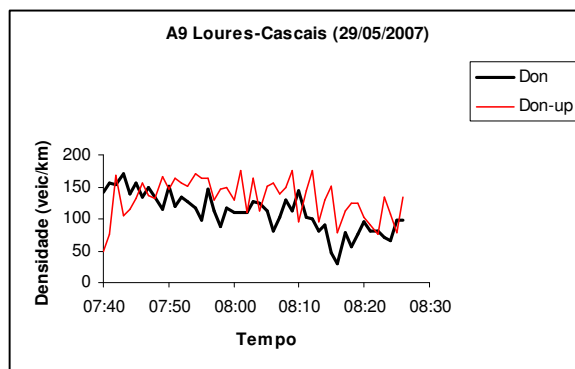


Figura 2.14 – Caudais na rampa de acesso junto ao nó (D_{on}) e a montante deste (D_{on-up})

Na Figura 2.14 o sistema mantém-se na fase de fluxo sincronizado pelas 7h37m e retorna à fase inicial quase uma hora depois (8h31m). Nunca chega a transitar para a fase WMJ, sendo o valor do caudal bem acima do limiar para ser considerado reduzido (anda em torno dos 1000 veículos/h).

²⁶ Para uma melhor confirmação do enunciado seria necessário analisar uma distância maior e utilizar na A9 mais detectores a montante. Uma imagem espaço-temporal suportaria a afirmação e elucidava com maior clareza o leitor. No entanto, a propagação da fila móvel longa na auto-estrada só é confirmada pela visualização das imagens de vídeo.

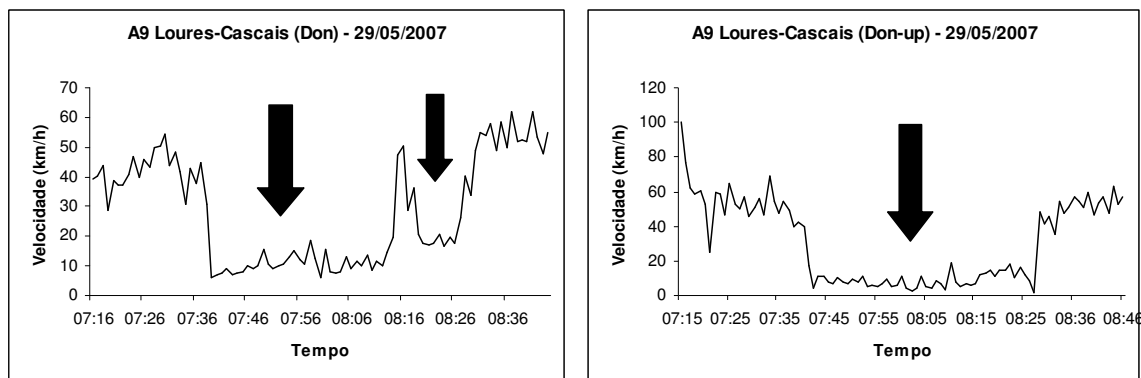


Figura 2.15 – Dinâmica do trânsito durante o congestionamento. As setas mostram o aparecimento das ondas de bloqueio móveis na zona de compressão do trânsito (intersecção das vias no detector D_{on}) e como a estrutura evolui em plena A9

A velocidade de dissolução do bloqueio é de 15 km/h, em consonância com resultados empíricos dos estudos até à data realizados.

O facto do sistema nunca transitar para a fase de WMJ mesmo existindo um estrangulamento pronunciado do trânsito (efeito de compressão) significa que se trata de um congestionamento de fraca intensidade. Embora a estrutura reflecta fenómenos dinâmicos comuns em situações de pára-arranque, esses não são significativamente agudos para que haja um crescimento da amplitude das filas móveis curtas e consequentemente a formação de WMJ's.

Ao observar o diagrama fundamental empírico dir-se-ia que a sua característica tem a forma de um U-invertido. O caudal cresce linearmente até a via ter uma densidade de 40 veículos/km. Para valores superiores de ocupação da auto-estrada dá-se uma depressão no caudal (e desta forma na velocidade), mas o fluxo permanece elevado até densidades na ordem dos 90 veículos/km (valor já associado a tráfego intenso e em situação de bloqueio). Durante a fase de fluxo sincronizado há uma grande dispersão dos estados pelos quais o sistema passa, os quais acabam por formar uma superfície no diagrama. Se por hipótese existisse uma fila móvel longa²⁷, esses estados estariam acima da recta associada à velocidade de propagação da onda, logo o

²⁷ Teoricamente quando há uma transição S-J os estados convergem assintoticamente para uma recta cujo declive é dado pela velocidade de propagação v_g da WMJ. As coordenadas associadas ao ponto de intersecção com o eixo das abcissas assumem um valor máximo de densidade na ordem dos 150 veículos/km. O ponto superior está associada ao caudal de descarga da WMJ que a experiência mostra ser sempre inferior ao caudal máximo da via em fluxo livre.

sistema permanece em regime de meta-estabilidade face a uma transição S-F. Este estado reforça a existência do efeito de compressão do congestionamento no nó da rede para a data em questão.

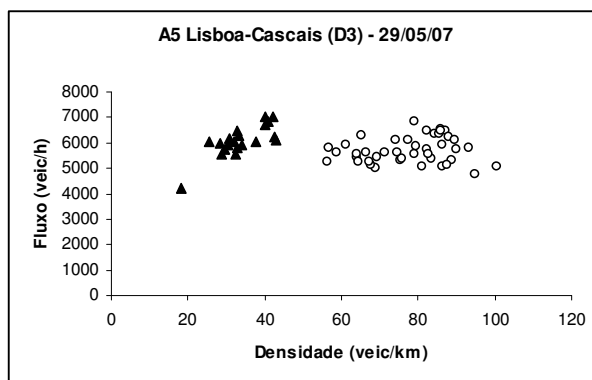


Figura 2.16 – Diagrama Fundamental Empírico para o detector situado no nó

Em termos de perda de capacidade da via tem-se:

$$\delta q = 7680 - 5095 = 2585 \text{ [veic / h]} \quad (2.5)$$

De seguida apresentam-se os resumos com os principais valores medidos da velocidade e do fluxo (Tabela 2.9 e Tabela 2.10).

| v_{\max}^{free} | $v_{\text{on},\max}^{\text{free}}$ | v_{\max}^{syn} | v_{\min}^{syn} | $v_{\text{on},\max}^{\text{syn}}$ | $v_{\text{on},\min}^{\text{syn}}$ |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 94 | 62 | 46 | 11 | 33 | 5 |

Tabela 2.9 – Velocidades observadas na A5 e A9 em troços contíguos ao nó a 29/06/2007

| $q_{\text{on},\max}^{\text{syn}}$ | $q_{\text{on},\text{pinch}}$ | $q_{\text{on},\min}^{\text{syn}}$ | q_{\max}^{free} | q_{FS} | q_{\max}^{syn} | q_{\min}^{syn} | $q_{\text{out}}^{(B)}$ |
|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 2760 | 1274 | 660 | 7680 | 7680 | 7620 | 4740 | 5095 |

Tabela 2.10 – Caudais máximo, mínimo e compressão (A5 e A9), entre as 7h15 e as 08h45 de 29/06/2007

2.3.3. 30 de Maio de 2007

Nesta data tanto na A5 como na A9 há a formação de uma estrutura de congestionamento idêntica, mas não se trata de um GP. Não é possível afirmar a ocorrência de uma fila móvel longa, mas existe claramente uma situação de condicionamento de ambas as vias (efeito de núcleo). As velocidades são bastantes baixas e o fluxo embora pequeno não atinge valores

abaixo dos 500 veículos/h (típico de uma WMJ). Como o caudal durante o período de compressão do tráfego não é estável nem próximo do fluxo limite de compressão q_{lim}^{pinch} (em redor dos 10% deste valor), não se considera a presença de um padrão de congestionamento intenso. Este pode ser visto como a justificação para que não se formem ondas móveis. O pára-arranca do trânsito quando acontece não é suficientemente forte e prolongado para levar à mudança de fases do sistema. Note-se que durante um congestionamento intenso o caudal é uma função monótona decrescente, o que claramente não sucede nos troços observados, basta verificar a coluna direita da Figura 2.17.

Porém, enquanto perdura o efeito de compressão do tráfego na A5 há a constituição de filas móveis curtas, isto é, oscilações em que existe uma queda significativa tanto da velocidade como do fluxo mas que não se propagam na via como as WMJ. Ao contrário das filas móveis longas, as NMJ não apresentam parâmetros característicos como a velocidade de propagação v_g e a sua amplitude é menor. Essas perturbações no trânsito que podem ser visualizadas na imagem do detector D2 Figura 2.17 não crescem e acabam inclusivé por se dissolver até ao troço seguinte (detector D1). É por este motivo que não há uma estrutura do tipo GP, tão típica em intersecções existentes nas redes rodoviárias onde a zona de compressão e a consequente formação de NMJ's leva a que o sistema transite da fase de fluxo sincronizado para a fase de bloqueio (WMJ).

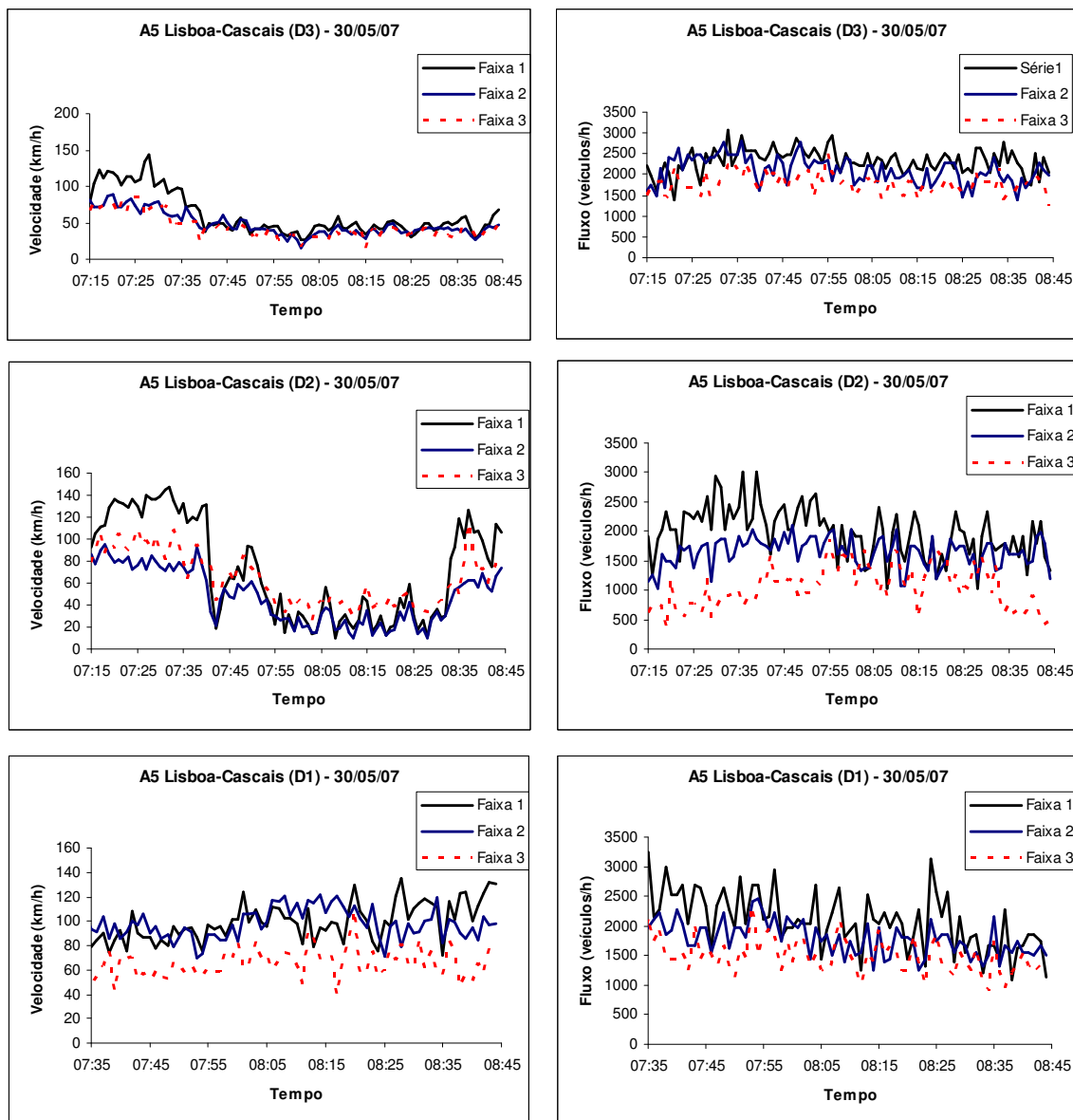


Figura 2.17 – Evolução temporal da velocidade e fluxo

O trânsito fica congestionado na A5 a partir das 7h39m e assim permanece no nó até ao fim do período de observação. O efeito de compressão salienta-se por volta das 7h42m e perdura até às 8h28m. A transição entre as fases de fluxo livre e sincronizado é rápida demorando pouco mais do que um minuto.

Quanto à velocidade de propagação da cauda de onda de congestionamento é sensivelmente de -10km/h.

| Detector | T _{FS} | T _{SF} | t _{FS} (min) | t _{SF} (min) |
|----------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| D3 | 7h39m | 08h45m | 1 | - |
| D2 | 7h42m | 8h33m | 2 | 3 |

Tabela 2.11 – Tempos associados à transição de fases do sistema no nó e a montante deste. Durações médias das transições

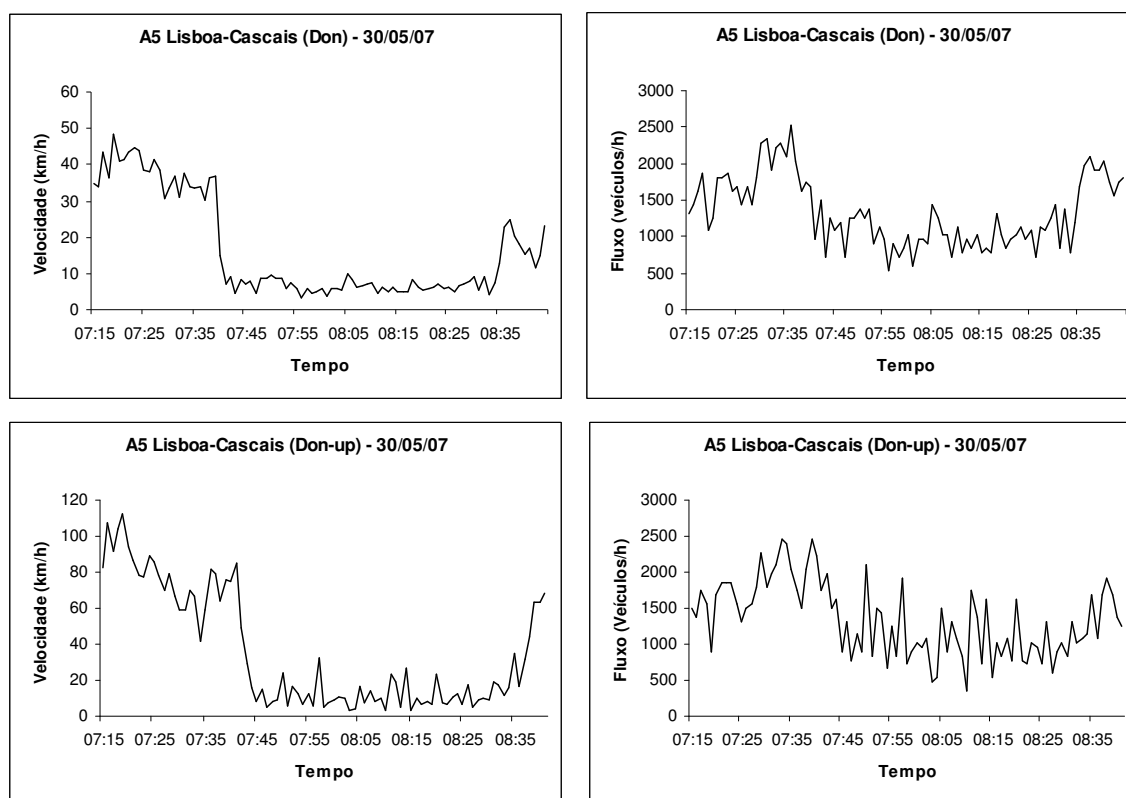


Figura 2.18 – Evolução temporal da velocidade e fluxo na rampa de acesso

Durante o período de observação, que decorre entre as 7h15m e as 8h45m, a rampa de acesso encontra-se congestionada. A situação agrava-se a partir das 7h41m com a formação do efeito núcleo. Este efeito é observado 4 minutos depois na faixa esquerda da A9, no detector D_{on-up}, que se encontra localizado a montante de D_{on} (colocado na rampa de acesso junto ao nó). A compressão do trânsito mantém-se nesta via durante 52 minutos e nesse pára-arranca dá-se um acidente automóvel por volta das 7h57m. Contudo, o acidente é rapidamente resolvido (menos de 10 minutos), não tendo por conseguinte potencial para transformação do padrão de

congestionamento²⁸. Embora este provoque o bloqueio momentâneo da faixa, o local onde se deu permite a passagem dos veículos pela área circundante não interrompendo o fluxo. Além disso, como as viaturas já se encontram a rodar a baixa velocidade não há uma depressão nesta variável cuja amplitude se aproxime do valor crítico para uma eventual mudança de fase.

O crescimento da procura da rampa de acesso q_{on} que precede o efeito núcleo, juntamente com a manutenção de um caudal elevado na A5 q_{in} a montante da intersecção, provoca o aparecimento em ambas as vias das zonas de compressão.

Durante esse período o comprimento L_{syn} da estrutura localizada de congestionamento LSP é aproximadamente de 1,2 km ao longo da A9. O caudal limite q_{lim}^{pinch} é de 540 veículos/h, sendo o valor médio da depressão de 991 veículos/h. A razão entre ambos é dada por:

$$\frac{q^{sym}}{q_{lim}^{pinch}} = \frac{991}{540} \approx 1,84$$

Ou seja, o fluxo médio do trânsito congestionado é quase duas vezes superior ao fluxo limiar. Tal explica porque motivo não crescem as oscilações que podiam provocar a formação de filas móveis longas. Há estrangulamento do trânsito mas não um total bloqueio do mesmo. Contudo, o baixo valor do caudal limite com os veículos parados momentaneamente e a rodarem igualmente a baixa velocidade indica a existência de congestionamento intenso na A9.

A 30 de Maio de 2007 a perda de capacidade no nó devido à formação do congestionamento não é determinada porque durante o intervalo de observação as vias mantiveram-se condicionadas e o sistema não regressou à fase de fluxo livre. O caudal de descarga q_{out}^B não pode deste modo ser determinado e, por conseguinte, a perda de capacidade δq .

2.3.4. 31 de Maio de 2007

Devido a uma colisão entre dois veículos ligeiros por volta das 07h20m no troço associado ao detector D1, sensivelmente a 1 km do nó em estudo, a via nesse local e a montante ficou bloqueada e os parâmetros definidos para a observação foram alterados. Lembre-se que um acidente é uma variável relevante no contexto do controlo rodoviário. Além disso, os veículos só foram removidos da faixa de rodagem 50 minutos depois, sendo que nesse período a câmara que

²⁸ Enquanto variáveis de controlo do trânsito os acidentes rodoviários costumam alterar a estrutura de congestionamento, provocando o aparecimento de perturbações que conduzem à formação de filas móveis longas.

serve para a captação dos dados esteve focada no problema. Se o intervalo da observação já estava comprometido por esta situação, a recolha de informação nesse troço e nesse dia ficou totalmente comprometida com a interrupção do vídeo por motivos técnicos no tempo remanescente.

No troço associado ao detector D2 (câmara 8-650) também existem modificações nas condições de observação. Entre as 7h22m e as 7h40m a câmara não permanece estática e dirigida ao local definido para a observação. Pelas 8h15m deixa de haver imagem de vídeo, inviabilizando qualquer recolha de informação e posterior processamento dos dados.

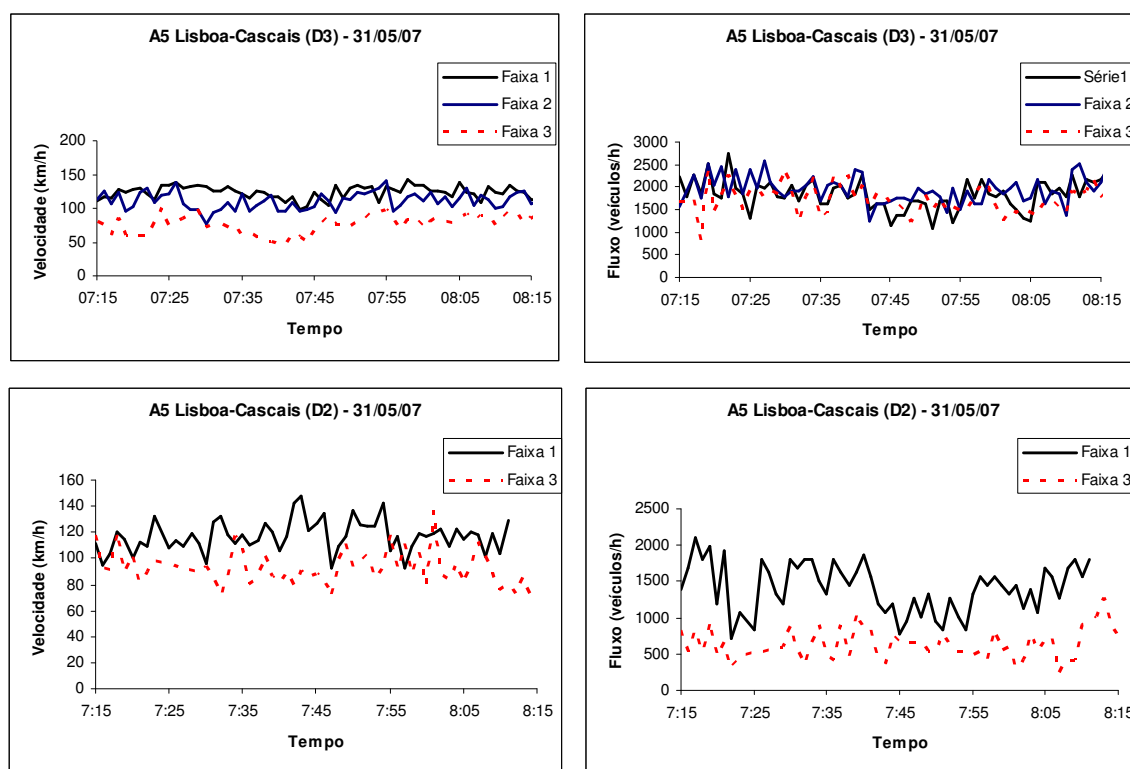


Figura 2.19 – Evolução temporal da velocidade e caudal

A observação da Figura 2.19 permite de imediato concluir que neste dia o trânsito permaneceu na fase de fluxo livre. As velocidades praticadas encontram-se nos valores comumente detectados em cada uma das faixas de rodagem. Qualitativamente, a explicação para o facto da via principal A5 permanecer desbloqueada no nó em estudo durante o intervalo de observação prende-se com o acidente rodoviário que ocorreu a montante, próximo do Estádio Nacional. Essa perturbação casuística levou à formação de congestionamento no local do

acidente, mas em contrapartida os veículos localizados na frente da onda de congestionamento e que se encontram quase parados podem acelerar a jusante da frente e atingir a velocidade desejada (a via está desobstruída e portanto os condutores aceleram até uma velocidade de referência que se situa em redor da velocidade livre de 120 km/h).

A Figura 2.20 onde se relaciona o caudal e a velocidade com a densidade de veículos no nó da rede e para a faixa central da via reforça a ideia do sistema se encontrar ao longo do período de observação unicamente na fase de fluxo livre. A ocupação da via é baixa (menos de 40 veículos/km) e existe correlação positiva entre as variáveis. À subida do caudal está associado um crescimento no número de veículos que se encontram no troço e, inversamente, a subida da densidade de viaturas no nó resulta numa circulação a velocidades proporcionalmente inferiores.

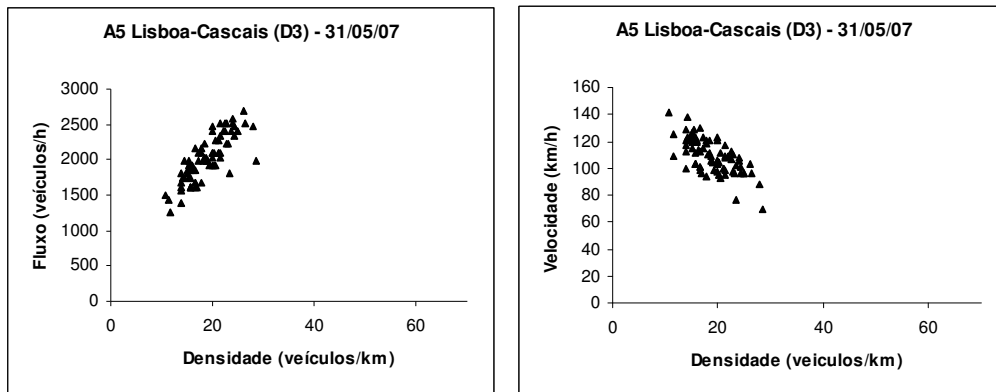


Figura 2.20 – Diagrama Fundamental Empírico para a faixa esquerda no detector situado na intersecção e gráfico da relação entre a densidade e a velocidade

Na rampa de acesso que liga a A9 à A5 a justificação para a ausência de congestionamento do trânsito tem uma natureza diferente. Embora o fluxo q_{on} esteja na gama de valores em que podem existir estados meta-estáveis, isto é, estados em que o sistema pode transitar de fase, tal não chega a suceder porque o caudal a montante do nó dado por $q_{sum} = q_{in} + q_{on}$ (representa a procura da via) é sempre inferior ao caudal de descarga do nó q_{out}^B não afectando a capacidade deste. Matematicamente,

$$q_{sum} < q_{out}^B \quad (2.6)$$

Em termos gráficos tem-se:

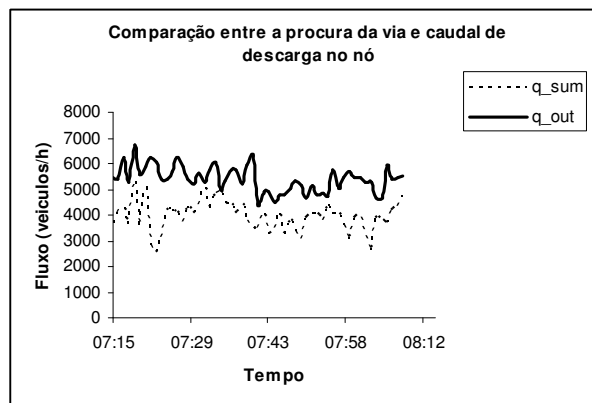


Figura 2.21 – Relação entre o caudal de descarga (q_{out}) e a procura por parte dos condutores (q_{sum})

Uma outra hipótese de explicação é comparar em cada instante as densidades no troço a jusante do nó com a zona de convergência entre a rampa de acesso e a via principal. Verifica-se que a densidade de veículos no nó mantém-se superior face à densidade de viaturas que se encontram na A5 no troço mais adiante.

Olhando para o diagrama fundamental empírico da rampa de acesso a relação entre o caudal e a densidade é linear, o mesmo sucedendo entre a velocidade e a densidade. Não há descontinuidades, nem sobreposição de estados. O sistema permanece na fase de fluxo livre sem qualquer instabilidade que destrua essa condição.

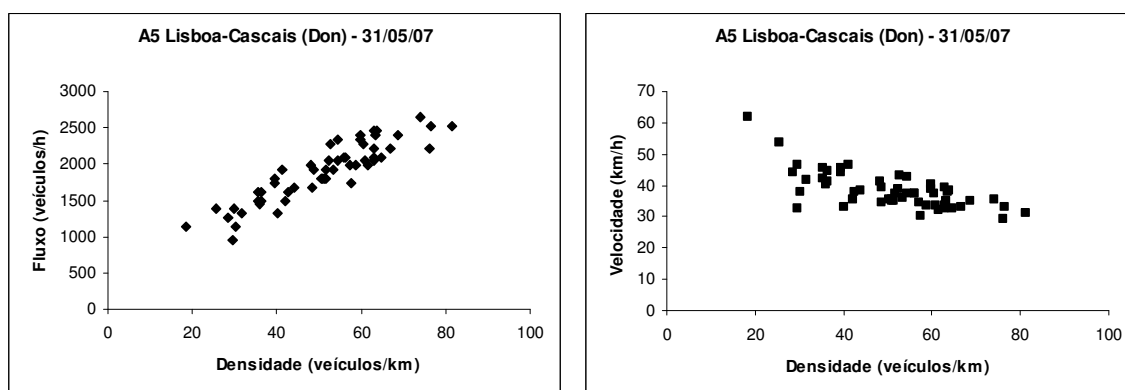


Figura 2.22 – Comportamento do fluxo e da velocidade em função da densidade de veículos na A5, na rampa de acesso junto ao nó da rede

Como é típico na dinâmica de fluxo livre não há sincronismo de velocidades, seja entre os veículos consecutivos que circulam na mesma faixa, seja entre as faixas de rodagem. Na Figura 2.23 ilustra-se este fenómeno para o dia em questão, comparando-se as velocidades medidas nas faixas de rodagem esquerda e central.

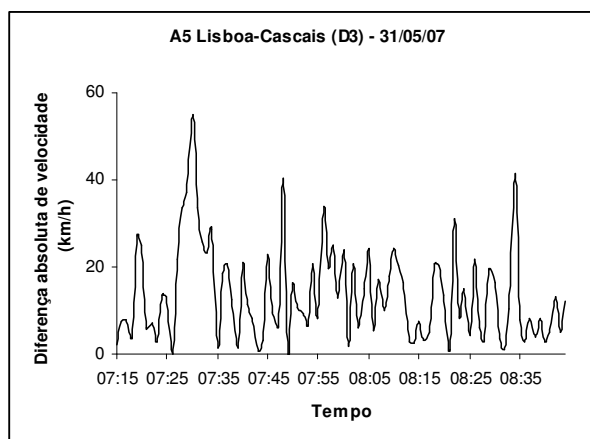


Figura 2.23 – Desvio entre a velocidade de circulação nas faixas esquerda e central da A5

Com a possibilidade de ultrapassagens e de os veículos mais rápidos poderem circular pela esquerda constata-se que a diferença de velocidades chega a alcançar os 60 km/h. Todavia, o comportamento do trânsito na faixa mais rápida está fortemente ligado às condições da faixa central. É por este motivo que o factor de correlação é elevado, sendo no caso $K = 0,82$.

Em suma, como a procura é abaixo do caudal de descarga e não há qualquer restrição à capacidade do nó não existe efeito de perda de capacidade da via. Não há igualmente qualquer efeito de núcleo ou histerese porque o sistema nunca muda de fase. Tanto a velocidade como o fluxo permanecem sensivelmente constantes ao longo do tempo (independência temporal). O facto da correlação entre o caudal e a densidade de trânsito ser elevada traduz a relação linear entre ambos. Tem-se $K = 0,93$.

A 31 de Maio de 2007 os valores mais relevantes da pressão do trânsito sobre as vias A5 e a A9 são os seguintes:

| $q_{on,max}^{free}$ | q_{on} | q_{max}^{free} | q |
|---------------------|----------|------------------|------|
| 2520 | 1898 | 7080 | 5622 |

Tabela 2.12 – Valores do fluxo na A5 e A9 durante o dia 31 de Maio de 2007

Embora a velocidade em ambas as vias permaneça quase constante ao longo do tempo, o fluxo apresenta oscilações. O desvio máximo em ambas ronda os 30%.

$$\left(\frac{q_{on,max}^{free}}{q_{on}} - 1\right) \times 100 \cong 33\% \quad e \quad \left(\frac{q_{max}^{free}}{q} - 1\right) \times 100 \cong 26\% \quad (2.7)$$

Em termos do parâmetro velocidade a Tabela 2.13 reforça a proposição de independência temporal existente, na medida em que dá indicações dos pequenos desvios entre as velocidades máximas praticadas pelos condutores e a velocidade média na via (pouco mais de 20 km/h).

| v_{max}^{free} | $v_{on,max}^{free}$ | v | v_{on} |
|------------------|---------------------|-----|----------|
| 138 | 62 | 110 | 40 |

Tabela 2.13 – Principais valores da velocidade (km/h) na A5 e A9 no dia 31 de Maio de 2007 durante o intervalo de observação

2.3.5. 1 de Junho de 2007

Em conformidade com as anteriores realizações, constata-se que durante o dia 1 de Junho de 2007 volta a constituir-se a partir da intersecção entre a A5 e a A9 uma estrutura de congestionamento em ambas as vias. Tal como nas observações feitas durante a semana, o congestionamento é mais intenso na rampa de acesso, constituída por uma única via, do que na via principal (A5)²⁹. O tipo de padrão que se forma devido ao nó determinístico é o mesmo que nos dias passados, nomeadamente um padrão de congestionamento localizado. A hora em que se dá a descontinuidade da velocidade, se forma o LSP e a duração deste nas duas vias são valores próximos dos encontrados nas restantes datas.

| T_{FS} | T_{SF} | $\tau_{FS} \text{ (min)}$ | $\tau_{SF} \text{ (min)}$ |
|----------|----------|---------------------------|---------------------------|
| 7h39m | 8h37m | 2 | 3 |

Tabela 2.14 – Resumo dos tempos de transição de fluxo livre para sincronizado e o inverso no nó da A5. Duração média das transições

²⁹ Ao haver apenas uma faixa de rodagem os veículos não têm a possibilidade de ultrapassar. Não há dispersão dos veículos que permita reduzir a densidade nessa faixa de rodagem.

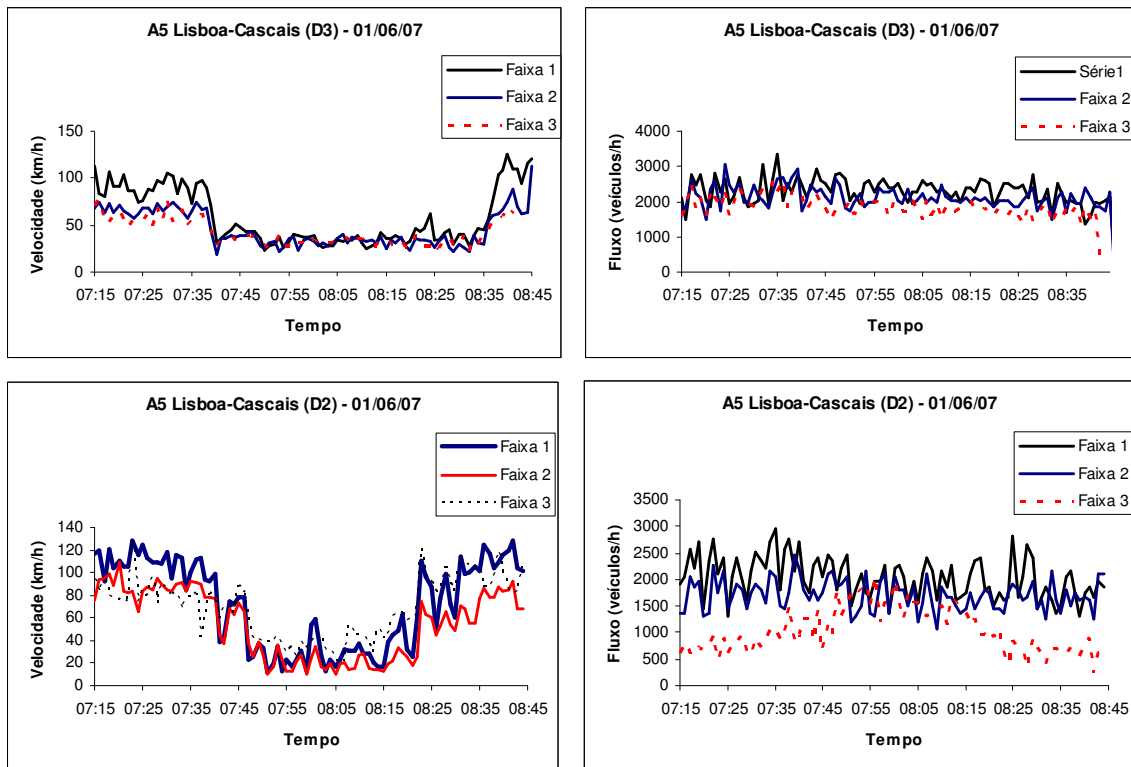


Figura 2.24 – Comportamento do trânsito rodoviário em termos de velocidade e caudal

Porém, neste dia o nó D1 encontra-se sempre na fase de fluxo livre. O congestionamento não chega a atingir este detector. Embora o comprimento do LSP oscile durante o intervalo da observação, a variação na cauda da onda é na ordem dos 200 m. Por inspeção das imagens vídeo o comprimento de via congestionada varia entre os 500 e os 700 metros. Este efeito dinâmico da estrutura de congestionamento é visível nas perturbações que ocorrem durante a fase de fluxo sincronizado, no detector D2, basta para tal atentar na Figura 2.24.

Os gráficos temporais da velocidade da Figura 2.24 também servem para apreender o efeito de sincronismo. As diferenças de velocidade entre as faixas de rodagem durante o condicionamento da via são significativamente inferiores às que existem com a via livre.

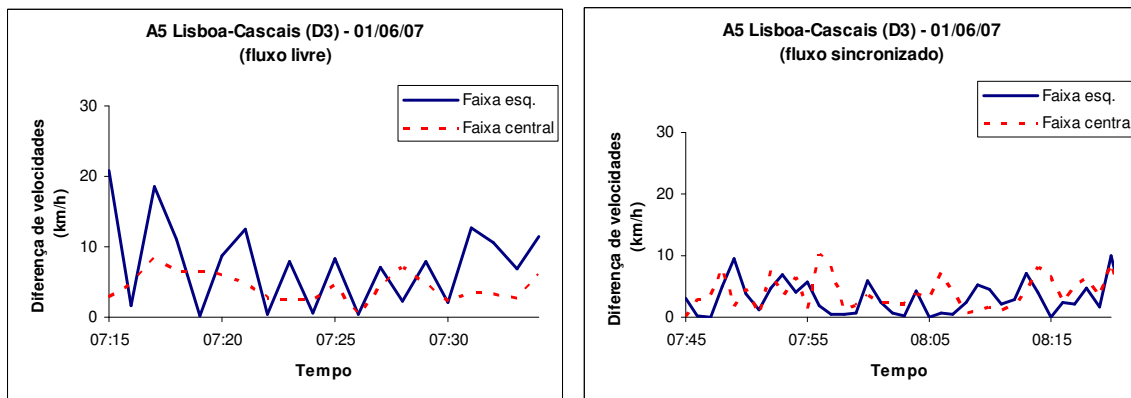


Figura 225 - Relação entre as velocidades praticadas na intersecção entre a A5 e a A9

A distribuição espacial do tráfego pelas várias faixas de rodagem e a menor probabilidade de ultrapassagens durante o condicionamento do trânsito potenciam a adaptação das velocidades, fenómeno que se torna claro na Figura 2.26.

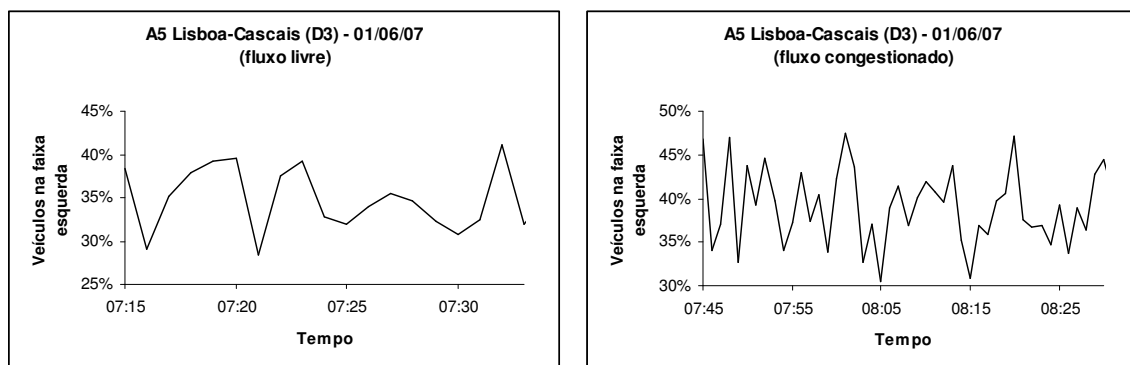


Figura 2.26 – Percentagem de veículos na faixa de rodagem mais à esquerda na via principal

Como já se tinha verificado para datas anteriores, também neste dia e para este tipo de padrão verifica-se que durante o congestionamento há uma optimização da ocupação da via. Quanto mais intenso for o congestionamento, menor é o espaço deixado entre veículos consecutivos. A distância vai diminuindo até atingir um valor limite que corresponde à distância mínima de segurança. Para o LSP formado neste dia é de 10 metros. Em fluxo livre os condutores desleixam o espaço que mantêm da viatura que o precede e estão mais preocupados em manter sensivelmente a mesma velocidade. Mais uma vez é validada a hipótese de Kerner publicada em [1], que admite a existência de várias densidades para a mesma velocidade ou vice-versa.

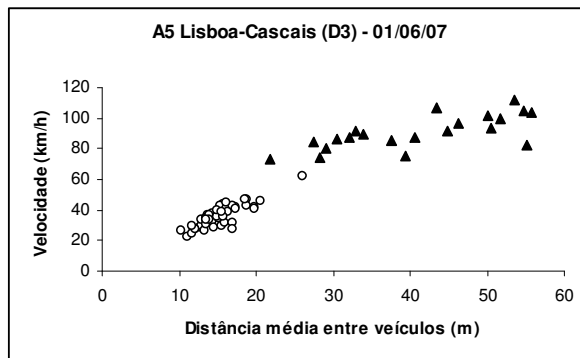


Figura 2.27 – Relação entre a velocidade medida e a distância média entre veículos consecutivos

Pelo diagrama fundamental empírico da rampa de acesso (Figura 2.28) também é possível verificar que o mesmo fenómeno sucede neste troço ainda com maior probabilidade por tratar-se de uma via constituída exclusivamente por uma faixa de rodagem em que os veículos não têm oportunidade de realizar ultrapassagens.

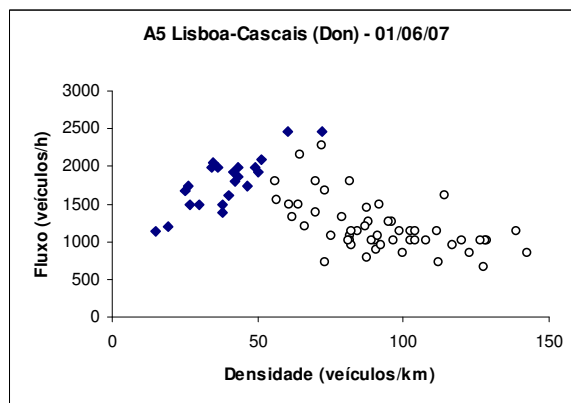


Figura 2.28 – Diagrama fundamental empírico

O diagrama mostra como o congestionamento é uma estrutura dinâmica em que as sobre-acelerações e travagens provocam perturbações no tráfego, originando uma região em que para uma determinada densidade de veículos na via existe uma multitude de valores possíveis do fluxo rodoviário.

A partir dos 55 veículos/km a rampa de acesso fica congestionada e o sistema nessa altura já transitou para a fase de fluxo sincronizado. É possível ver a descontinuidade da velocidade no momento da transição de fases que ocorre sensivelmente aos 40 km/h. Como expectável a

velocidade é uma função monótona decrescente em relação à densidade, sendo que a partir dos 70 veículos/km se chega a um valor de saturação na ordem dos 10 km/h³⁰.

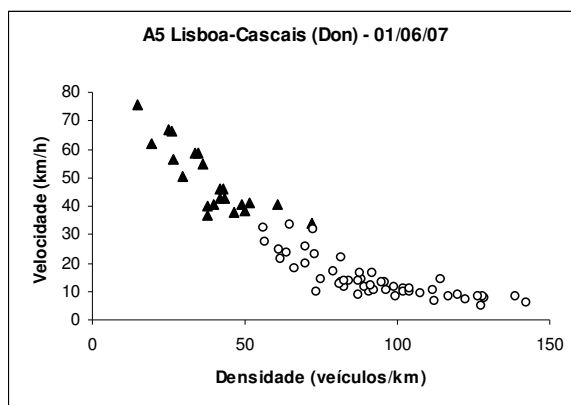


Figura 2.29 – Evolução da velocidade em função da densidade de veículos presentes na via de acesso

Quando geralmente o congestionamento começa a diluir-se na rampa de acesso, tal não sucedeu na presente data em toda a extensão da via, pois por volta das 8h32m ocorreu uma pequena colisão entre viaturas. Donde, a onda de congestionamento permaneceu a montante do nó durante o restante tempo da observação. Junto à bifurcação com a A5 a rampa ficou livre o que contribuiu para a dissolução do congestionamento da via principal minutos mais tarde. A Figura 2.30 dá conta do acidente mencionado basta para tal comparar a evolução temporal da velocidade e caudal do trânsito nessa hora nos detectores D_{on} (nó) e D_{on-up} (500 m a montante do nó).

³⁰ Trata-se de um valor médio que esconde o facto de haver veículos que nesse período de tempo podem estar parados e outros circularem a velocidades superiores ou inclusivé o mesmo veículo no intervalo de tempo utilizado para a realização da média ter estado parado e ter saído desse estado. É aqui que se torna pertinente uma abordagem microscópica do congestionamento.

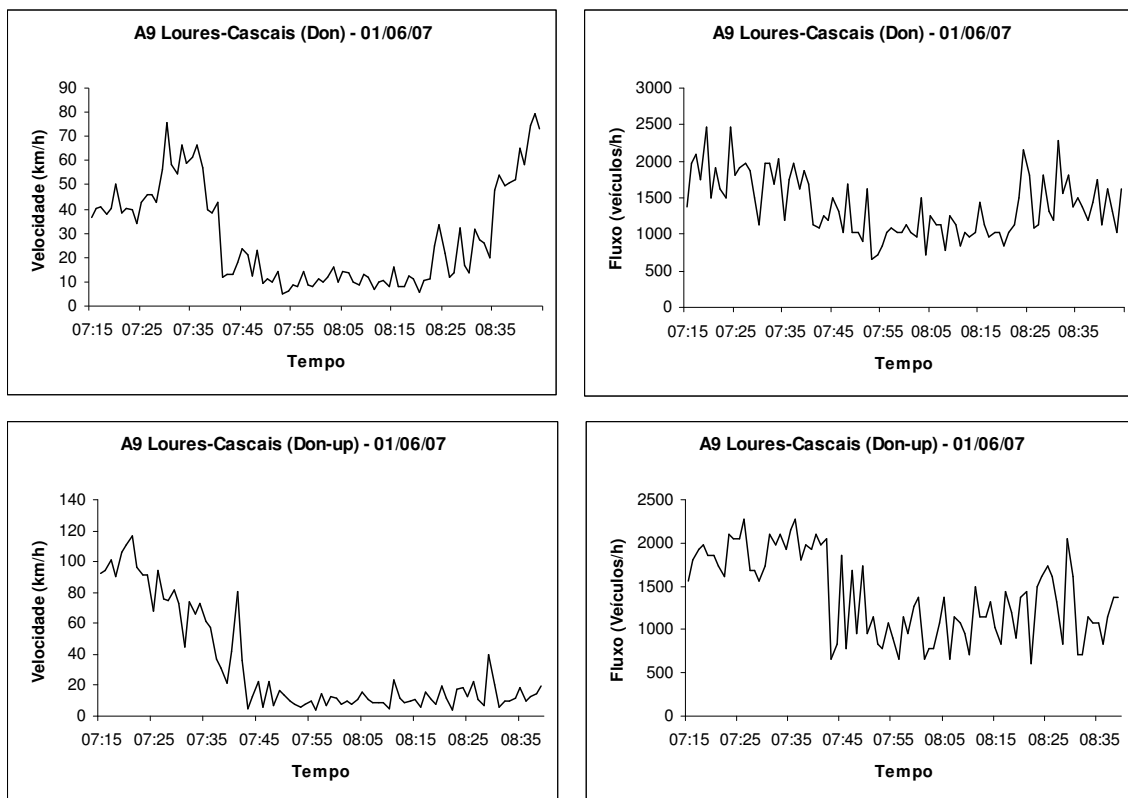


Figura 2.30 – Evolução temporal da velocidade e fluxo na A9

Neste dia as capacidades mínima e máxima em cada uma das fases do trânsito para ambas as vias (A5 e A9), bem como os caudais de pré-descarga e descarga são:

| $q_{on,max}^{free}$ | $q_{on,FS}$ | $q_{on,max}^{syn}$ | $q_{on,min}^{syn}$ | q_{max}^{free} | q_{FS} | q_{max}^{syn} | q_{min}^{syn} | $q_{out}^{(B)}$ |
|---------------------|-------------|--------------------|--------------------|------------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2460 | 1680 | 1620 | 660 | 7440 | 7440 | 6980 | 4740 | 5170 |

Tabela 2.15 – Resumo dos principais valores de caudal na A5 e A9 a 01/06/2007

As baixas velocidades alcançadas pelo trânsito durante a fase de fluxo sincronizado (Tabela 2.16) revelam existir um efeito de compressão associado ao nó em estudo. O tipo de congestionamento que se forma (LSP), as variáveis de controlo favoráveis (ex: boas condições climáticas ou ausência de obras) e a fraca pressão sobre o nó (caudal a jusante com a via livre face ao caudal de descarga do nó) justificam o facto de não se formarem ondas de bloqueio que perdurem e se propaguem na via (WMJ's).

| v_{\max}^{free} | $v_{\text{on},\max}^{\text{free}}$ | v_{\max}^{syn} | v_{\min}^{syn} | $v_{\text{on},\max}^{\text{syn}}$ | $v_{\text{on},\min}^{\text{syn}}$ |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 125 | 80 | 62 | 18 | 33 | 5 |

Tabela 2.16 – Valores mais relevantes da velocidade com e sem congestionamento a 01/06/2007

No que respeita à perda de capacidade da via no nó tem-se:

$$\delta q = q_{\max}^{\text{free},B} - q_{\text{out}}^B = 7440 - 5170 = 2270 \text{ [veic / h]} \quad (2.8)$$

2.4. Resumo da análise empírica

A observação realizada confirma a presença de um nó efectivo entre os quilómetros 8 e 9 na A5, sentido Lisboa-Cascais. A intersecção é designada pela concessionária da via, a Brisa – Autoestradas de Portugal S.A., como “Nó Estádio 2” e situa-se após a “saída 6” e antes do “Nó Oeiras 2”, junto às bombas de abastecimento de combustível.

A perturbação do trânsito acontece todos os dias observados, entre as 7h15m e as 8h45m. O congestionamento típico neste nó é uma estrutura espacial localizada LSP (*Localized Synchronized Pattern*), que se caracteriza como se viu em 1.1 por ser um padrão identificável e delimitado espacialmente na via. A frente de onda deste congestionamento está fixa imediatamente a jusante da zona de reunião entre a rampa de acesso da A9 e a A5. Quando se forma, este congestionamento cresce e propaga-se em ambas as vias, atingindo entre os 200 e 400 metros na via principal e entre os 500 e os 1000 metros na A9. O facto da onda ser mais comprida na rampa de acesso prende-se com a existência de uma única faixa de rodagem, enquanto na A5 existem 3 faixas de rodagem disponíveis. O tempo médio de formação e dissolução da onda de congestionamento é de sensivelmente 2 minutos.

Embora exista uma densidade elevada de veículos a jusante do nó na A5 devido às portagens de Porto Salvo e Oeiras, o congestionamento que se constitui na intersecção entre a A5 e a A9 no sentido Lisboa-Cascais ocorre de forma espontânea. A transição F-S (da fase de fluxo livre para a fase de fluxo sincronizado) é de 1ª ordem e não é induzida por qualquer onda que se propague a partir do troço adiante.

Enquanto decorreu a experiência não houve qualquer transformação no perfil do congestionamento. A estrutura não evoluiu para um padrão do tipo GP (*General Pattern*) tão característico em nós onde existe uma rampa de acesso. Se é verdade que existiram períodos de

congestionamento intenso, as perturbações nesta onda de pára-arranque devido às sobreacelerações e travagens bruscas nunca atingiram a amplitude crítica ou uma duração que levasse ao crescimento das filas móveis curtas (ondas constituídas exclusivamente pela suas cristas) e à posterior formação de filas móveis longas WMJ (*Wide Moving Jams*). O motivo principal para que não tenha havido uma modificação na natureza da estrutura de congestionamento baseia-se no caudal de descarga que consegue responder ao fluxo elevado associado à procura de ambas as vias. É por esta razão que o trânsito nunca transita da fase de fluxo sincronizado para a fase de WMJ.

Se não há uma mudança de fases S-J, verifica-se todavia um carácter de auto-regulação do tráfego rodoviário, na medida em que existe um efeito de histerese no trânsito. Há uma disrupção espontânea da velocidade que leva o sistema a transitar da fase de fluxo livre para a fase de fluxo sincronizado, mas o contrário também é válido, isto é, durante a depressão a distribuição mais uniforme dos veículos pelas faixas de rodagem disponíveis e a adaptação de velocidades (efeito de sincronismo tanto entre veículos consecutivos na mesma faixa de rodagem como entre as viaturas que circulam nas diferentes faixas) leva posteriormente à dissolução do congestionamento e, conseqüentemente, ao regresso da fase de fluxo livre nas vias A5 e A9. Como a rampa de acesso é constituída apenas por uma faixa de rodagem, o efeito de sincronismo não é tão peremptório e acaba por pesar mais para o fim do congestionamento o facto dos veículos circularem a velocidades mais reduzidas (a partir de uma determinada altura o caudal a montante do nó é inferior ao caudal de descarga e isso permite a recuperação do condicionamento que se instalou na A9).

Em termos quantitativos, a velocidade livre na A5 situa-se no valor legalmente estabelecido para as auto-estradas portuguesas, designadamente os 120 km/h. Já na rampa de acesso devido à sua geometria (reunião com a via principal é precedida por uma curva) a velocidade livre dos veículos ronda os 65 km/h. Quando se forma o congestionamento, a velocidade média praticada na A5, sentido Lisboa-Cascais, junto ao nó da rede anda entre os 20 e os 50 km/h, crescendo gradualmente a montante deste. Quando se dá o efeito de compressão este valor é em certos intervalos de tempo inferior aos 20 km/h. Como o congestionamento é um padrão espacialmente localizado, nos troços subsequentes à zona condicionada as velocidades encontram-se em valores associados à via desobstruída.

Situação similar acontece na rampa de acesso/A9, com velocidades muito baixas junto à zona

de intersecção das vias, as quais vão crescendo gradualmente consoante os veículos se encontram mais afastados do ponto de estrangulamento. Em situação de trânsito comprimido a velocidade na A9 revelou-se frequentemente com valores muito baixos (10 km/h), estando o trânsito pontualmente parado. Como já foi dito esta situação de congestionamento intenso na rampa de acesso ao invés do que sucede na A5 tem muito que ver com o facto de existir apenas uma faixa de rodagem que inviabiliza as ultrapassagens e a dispersão dos veículos (existe maior pressão sobre o nó da rede).

No que concerne aos fluxos presentes em várias localizações das vias constata-se uma capacidade máxima do nó $q_{C,max}$ de 7680 veículos/h. O caudal de pré-descarga q_{FS} coincide geralmente com a capacidade máxima do sistema para se manter na fase de fluxo livre, ou seja, a depressão no trânsito dá-se quando o tráfego atinge o valor máximo de intensidade que o nó consegue suportar. Esse valor é portanto de 7680 veículos/h. O valor limite/limiar para se dar uma disrupção do trânsito e a mudança de fases F-S, isto é, o caudal mínimo abaixo do qual não se verificou congestionamento no nó $q_{c,min}$ é de 6240 veículos/h.

Em termos do caudal de descarga na intersecção q_{out}^B (medida do fluxo na via livre a jusante do congestionamento) varia ao longo dos 5 dias da observação entre os 5095 e os 5533 veículos/h.

Quanto à perda de capacidade do nó, resultante da formação e dissolução do congestionamento (efeito histerese), é dado no pior cenário por:

$$\delta q = 1145 \text{ [veículos/h]} \quad (2.9)$$

e numa perspectiva mais optimística:

$$\delta q = 707 \text{ [veículos/h]} \quad (2.10)$$

Após a sua constituição no nó, a propagação da onda de congestionamento a montante fez-se a uma velocidade entre os -10 e os -18 km/h (sinal negativo a indicar que a velocidade de propagação é contrária à direcção do fluxo rodoviário). A dissolução procedeu-se contudo a uma velocidade superior, entre os 15 e os 30 km/h.

O comprimento da onda apresentou nos dias observados um comportamento dinâmico, variando no período de congestionamento entre os 400 e os 700 metros na via principal e alcançando os 1200 metros na A9.

Durante o congestionamento, na situação de pára-arranque, os veículos mantiveram entre si uma distância mínima, denominada de distância de segurança, que rondou os 8-10 metros. Já na situação da via desbloqueada a distância entre veículos consecutivos atinge um ponto de saturação na ordem dos 100 metros.

A densidade máxima da via na fase de fluxo livre vai até aos 40 veículos/km e anda geralmente nos 70 veículos/km na fase de fluxo sincronizado. Todavia, consoante o tráfego é mais ou menos intenso no período de congestionamento a densidade pode ultrapassar os 100 veículos/km (cenário de pára-arranque). Para terminar, apresenta-se um quadro-resumo com os principais valores quantitativos dos parâmetros que serviram de base ao estudo.

| Parâmetro | Valor | |
|--|---------------------------------------|--------------|
| Capacidade máxima do nó | 7680 [veiculos/h] | |
| Capacidade mínima do nó | 6240 [veiculos/h] | |
| Caudal de descarga do congestionamento | 5095-5533 [veiculos/h] | |
| Perda de capacidade do nó | 707-1145 [veiculos/h] | |
| Hora da formação do congestionamento | 8h23m-8h45m | |
| Duração do congestionamento | 38-71 [minutos] | |
| Tipo de congestionamento | Padrão espacialmente delimitado (LSP) | |
| Intensidade do congestionamento | A5 | A9 |
| | fraco | forte |
| Comprimento da onda de congestionamento | A5 | A9 |
| | 400-700 [m] | 400-1200 [m] |
| Tempo médio para a constituição do congestionamento | 1-3 [minutos] | |
| Tempo médio para a dissolução do congestionamento | 2-9 [minutos] | |
| Velocidade de propagação da onda de congestionamento | 10-18 [km/h] | |
| Velocidade de dissolução da onda de congestionamento | 15-30 [km/h] | |
| Distância de segurança mínima | 8-10 [m] | |
| Distância máxima entre veículos consecutivos | 100 [m] | |
| Densidade média durante o congestionamento | 70-90 [veiculos/km] | |
| Densidade máxima da via livre | 40 [veiculos/km] | |
| Média da velocidade máxima na via principal livre | A5 | A9 |
| | 125 [km/h] | 69 [km/h] |
| Média da velocidade durante o congestionamento | A5 | A9 |
| | 42 [km/h] | 22 [km/h] |
| Velocidades durante o estrangulamento do trânsito (compressão) | 10 [km/h] | |

Tabela 2.17 – Síntese dos principais resultados quantitativos do estudo

3. CONCLUSÕES

Embora a análise do trânsito rodoviário sob o ponto de vista técnico-científico mereça a atenção de físicos e engenheiros há algumas décadas, o crescimento exponencial de viaturas, a crescente complexidade das redes e o impacto económico, social e ambiental que estas têm levou ao nascimento de novas teorias e modelos matemáticos nos últimos anos. Todavia, os resultados obtidos pela investigação desenvolvida têm sido fundamentados em simulações e protótipos. O número elevado de meios necessários para a extracção de dados reais, a dimensão dos sistemas físicos em funcionamento, a longa janela temporal para a realização das observações e a variabilidade das condições/inobservabilidade do sistema funcionam como obstáculos à realização de estudos empíricos.

O presente trabalho é uma tentativa para aplicar uma das teorias mais recentes neste domínio científico, a teoria das 3 Fases, à identificação e reconhecimento dos padrões de congestionamento formados num nó de uma auto-estrada nacional (nó 2 do Estádio Nacional localizado na A5 no sentido Lisboa-Cascais), bem como à avaliação da perda de capacidade da via devido a esse congestionamento do trânsito.

Até à data a principal crítica à teoria 3F prende-se com a restrição geográfica onde se realizaram as experiências, pois os grupos e entidades envolvidas estão situados na Alemanha e por conseguinte realizaram aí as suas observações. Os críticos adovgam que não é possível a generalização das teses desenvolvidas devido às diferentes realidades normativas, culturais ou geográficas existentes noutros países e continentes. Este estudo é um impulso para comprovar a generalidade do quadro conceptual e metodológico proposto por Boris Kerner. Se *per si* este trabalho não é suficiente para afirmar tal generalidade serviu pelo menos para criar uma base empírica para validação de resultados ou aplicações futuras.

Através da recolha dos dados por meio de câmaras de vídeo e do seu posterior processamento foi possível realizar uma análise macroscópica do sistema. Adaptando a metodologia proposta por Boris Kerner identificou-se um tipo de padrão sistemático (congestionamento sincronizado e espacialmente limitado – LSP) nas duas vias que se intersectam e determinou-se a respectiva perda de capacidade. As conclusões a que se chega são baseadas fundamentalmente na análise

das grandezas globais do sistema, designadamente da velocidade, densidade e fluxo rodoviário. Provou-se a existência de efeitos no trânsito típicos de outros sistemas (ex: sistemas biológicos e sistemas eléctricos), tais como histerese, adaptação ou dispersão.

A Tabela 2.17 da secção 2.4 sintetiza os principais resultados provenientes das observações realizadas. É possível compreender o tipo de congestionamento que se forma nas auto-estradas A5 e A9 devido à intersecção de ambas as vias. É possível ainda identificar univocamente o local onde se forma essa estrutura e ter uma imagem de como evolui ao longo do tempo. A compreensão do desempenho da via torna-se exequível através da análise dos principais parâmetros do tráfego rodoviário resultantes do processamento das imagens de vídeo, embora no futuro tais medidas devam ser extraídas utilizando tecnologia mais robusta para o efeito, como por exemplo a utilização de sensores indutivos implantados na via.

Ora, o presente estudo permite concluir que a zona de intersecção entre a A5 e a A9, aproximadamente ao quilómetro 9 no sentido Lisboa-Cascais, se trata de um nó efectivo de estrangulamento do trânsito, pelo menos durante os dias úteis da semana em que a procura das vias é maior (acima dos 1500 veículos/h/faixa). Este ponto de condicionamento da rede - que se trata de um nó de congestionamento isolado - coincide com a localização física da intersecção das vias e, ao longo das várias observações em que sucedeu o congestionamento, a frente de onda permaneceu nesse local. Já a cauda de onda variou espacialmente nos diferentes dias em função da procura das vias, embora em cada realização tenha permanecido - com pequenas oscilações (até 200 metros) - numa localização definida. Naturalmente, por não ter faixas de ultrapassagem, a rampa de acesso é mais sensível à pressão sobre o nó da rede, tendo o comprimento do congestionamento variado entre os 400 e os 1200 metros. Na A5 verifica-se a existência do efeito de difusão, que leva à dispersão mais uniforme dos veículos pelas várias faixas de rodagem na altura do congestionamento. Isto contribui para um maior equilíbrio entre o caudal de descarga e o caudal de entrada e, consequentemente, impede o crescimento da estrutura (nunca superior aos 700 metros).

Trata-se, portanto, de um padrão de congestionamento localizado que não se propaga indefinidamente nas vias. Esta estrutura apresenta um comportamento estável (estados homogéneos de velocidade) enquanto não se dá o efeito de compressão (núcleo), mas torna-se oscilatória durante o período de pára-arranque. O núcleo formou-se na maioria dos dias e a sua localização coincide com o nó. Durante o estrangulamento do fluxo rodoviário a velocidade

média é de 10 km/h. Ao contrário do que sucede quando o congestionamento é menos intenso, não há sincronismo de velocidades com a compressão do trânsito, quer seja entre veículos consecutivos que circulam na mesma via, quer entre as várias faixas de rodagem. Já o factor de correlação entre velocidades é elevado (acima dos 0,9) quando os veículos não se encontram na situação de pára-arranque.

Porém, a compressão do trânsito não é acompanhada pelo aparecimento de filas móveis longas e o padrão LSP não evolui para uma estrutura do tipo GP (comum em nós desta natureza). Como mencionado na secção 1.5 o principal motivo prende-se com o facto do caudal a jusante do nó permancer mais elevado que o fluxo a montante o que não permite o crescimento das pequenas oscilações na frente de onda do estrangulamento e a subsequente formação da WMJ.

O tempo médio em que perdurou o cenário de congestionamento não deve ser considerado crítico, uma vez que ronda 45-60 minutos de duração. Além disso, comprova-se o princípio de auto-regulação do fluxo rodoviário, assistindo-se ao efeito de histerese, com a transição espontânea do trânsito da fase de via livre para fluxo sincronizado e vice-versa. No caso em análise essas transições acontecem de forma rápida (geralmente dois minutos) e com a queda abrupta da velocidade (amplitudes na ordem dos 100 km/h) o que pode afectar a segurança da via (maior probabilidade de colisões devido às sobreacelerações e travagens bruscas).

As densidades nas vias apresentam valores regulares para as duas fases que o sistema atravessa. Durante o fluxo livre a densidade máxima é próxima dos 40 veículos/km e na fase de fluxo sincronizado varia maioritariamente entre os 70-90 veículos/km. Mesmo com densidades dos 100 veículos/km, o tráfego nunca transita para o estado de bloqueio (WMJ).

A A5 mantém o nível de serviço entre os 6240 e os 7680 veículos/h, com uma perda de capacidade por volta dos mil veículos (13-16 %) devido à ocorrência do congestionamento.

Enquanto um dos principais objectivos do presente estudo foi possível concluir positivamente da aplicabilidade da teoria qualitativa de Kerner - apresentada em [1] - na caracterização dos nós rodoviários presentes nas auto-estradas nacionais. Os resultados qualitativos e quantitativos do presente estudo estão em linha com a teoria 3F, embora em futuros trabalhos se deva salvaguardar os seguintes requisitos:

- Extensão do troço analisado superior a 3 km para possibilitar uma análise da evolução espacial dos padrões de congestionamento;
- Existência de sensores indutivos nas vias ou tecnologia afim que permita a recolha

continua dos dados sobre as principais grandezas locais do trânsito (caudal, densidade e velocidade);

- Período de observação superior a um trimestre de modo a ter uma amostra que possibilite a análise estatística do trânsito.

Embora a análise técnico-económica para intervenção no nó não possa naturalmente cingir-se ao presente estudo (são necessários estudos de impacte ambiental, análise B/C, etc), os resultados do presente relatório – associados a condicionantes como a proximidade das bombas de abastecimento de combustível ou a existência de um viaduto imediatamente a jusante do nó – poderiam desde logo fazer claudicar alguns dos cenários possíveis de investimento (ex: aumento do número de faixas de rodagem).

Já a evolução dos sistemas de gestão de trânsito com vista ao crescimento da eficiência operacional, aumento da segurança rodoviária e a melhoria na qualidade de serviço são factores abonatórios para a adopção de tecnologia que permita a detecção, acompanhamento e previsão de ondas de congestionamento na via e sirva de suporte ao desenvolvimento de sistemas de tráfego inteligentes (informação e aconselhamento em tempo real a condutores, comunicação inter-veículos, entre outros). Para tal, a aquisição de sensores para medição das principais variáveis do fluxo rodoviário e a instalação das respectivas redes de comunicação seriam os passos lógicos neste estágio inicial e deveriam ser prioritários no esforço financeiro que pudesse hipoteticamente ser realizado.

GLOSSÁRIO

Amplitude crítica: Valor limite para a intensidade de uma perturbação acima do qual dá-se uma transição de fases do sistema. Quando a amplitude da perturbação iguala o valor da amplitude crítica está-se perante uma perturbação local crítica (ex: formação de um núcleo no trânsito que cresce e dá origem à transição de fases).

Auto-organização: Fenómeno que pode ser observado sempre que ocorre no trânsito uma transição de fases espontânea ou induzida que conduz à formação de padrões de congestionamento e à sua subsequente dissolução (ex: transições F-S e S-F ou a velocidade média de propagação na frente de onda a jusante da Fila Móvel Longa v_g permanecer constante).

Critério [J]: Critério utilizado para identificar a fase de Fila Móvel Longa, a qual é caracterizada por ter uma velocidade de propagação constante na frente de onda a jusante ($v_g = \text{cte}$), independentemente da onda se propagar por diversos nós da via ou passar por vários estados do trânsito.

Critério [S]: Critério utilizado para identificar a fase de Fluxo Sincronizado na qual, ao contrário do que sucede no Fila Móvel Longa, a velocidade de propagação não é constante. Os veículos aceleram entre a passagem da fase de Fluxo Sincronizado para a fase de Fluxo Livre (encontra-se a jusante da frente de onda). Normalmente, na fase de Fluxo Sincronizado a frente de onda a jusante está fixa no nó que provocou a onda de congestionamento.

Efeito de histerese: Característica que se pode observar nos planos $q(\rho)$ ou $v(\rho)$ sempre que se analise uma sequência de fases em que o sistema transita de uma situação inicial para uma outra fase e regressa posteriormente à fase inicial (ex: sequência F-S-F).

Efeito de núcleo: Acontece sempre que o valor da perturbação local excede a amplitude

crítica, havendo a consequente transição de fases (crescimento da perturbação a partir do núcleo). Este efeito está relacionado com a meta-estabilidade.

Estado do trânsito: Imagem do sistema num dado instante caracterizada por um conjunto de propriedades estatísticas associadas às variáveis de tráfego rodoviário e a um conjunto de parâmetros de controlo.

Estado estável: Estado de equilíbrio em que mesmo que ocorra uma perturbação local não se dá a transição de fases do sistema. A probabilidade de mudança de fases é nula num estado estável, sendo que os valores das variáveis de tráfego se encontram abaixo do respectivo valor de *threshold*. Todavia, o estado do trânsito pode ser estável face a um tipo de transição e meta-estável relativamente a outro.

Estado meta-estável: Pequenas oscilações no sistema (perturbações locais no trânsito de baixa intensidade) não conduzem à transição de fases, mas se a variação excede a amplitude crítica a perturbação cresce e dá origem a uma mudança de fases.

Fase do trânsito: Conjunto de estados que estão relacionados a fenómenos espaço-temporais específicos/únicos.

Frente de onda: Região de transição espacial entre dois estados ou duas fases. Para evitar qualquer equívoco, no presente relatório denomina-se a frente a montante como cauda de onda.

Intervalo crítico: Conjunto de valores de uma variável de tráfego que se encontram entre o valor de *threshold* e o valor crítico. Embora não tenha necessariamente de suceder, existe a probabilidade de ocorrência de uma transição de fases neste intervalo.

Nó de congestionamento: Nó em que é possível a ocorrência espontânea de um congestionamento, com a formação de um padrão a montante do nó. Se o fenómeno espaço-temporal associado a esse padrão não afectar nenhum nó adjacente, então diz-se que o nó está isolado. A localização efectiva do nó pode-se encontrar na sua vizinhança (entenda-se por

localização efectiva o local da via onde a frente de onda do Fluxo Sincronizado se fixou).

Padrão de Fluxo Sincronizado (SP): Padrão de congestionamento associado à fase de Fluxo Sincronizado onde não é possível emergir um Fila Móvel Longa.

Padrão Geral (GP): Padrão de congestionamento associado às fases de Fluxo Sincronizado e Fila Móvel Longa. Está relacionado com a sequência de transições F-S-J (na fase de Fluxo Sincronizado a montante do nó podem emergir espontaneamente Filas Móveis Longas ou WMJ).

Parâmetro característico: Parâmetro único, previsível, coerente e reproduzível associado a um padrão de congestionamento e o qual não depende das condições iniciais do trânsito. Para os mesmos parâmetros de controlo o valor do parâmetro característico é independente da evolução temporal do sistema. vg é um parâmetro característico da fase de Fila Móvel Longa.

Parâmetro de controlo: Característica cuja mudança de valor pode alterar o estado do sistema, afectando as variáveis de tráfego. Exemplos de parâmetros de controlo são as condições atmosféricas, as características do veículo ou as condições da via de rodagem.

Perda de capacidade: Medida do impacto da onda de congestionamento sobre a resposta da via no regime normal de funcionamento. É o resultado da existência do efeito de histerese no sistema, com a transição da via desbloqueada para a fase de Fluxo Sincronizado e o retorno posterior à fase inicial.

Perturbação local: Variação de uma variável do tráfego (ex: fluxo) num determinado ponto da via. A perturbação pode ser determinística ou aleatória se ocorre, respectivamente, devido a um nó permanente da via ou devido a uma situação arbitrária (ex: mudança de faixa de rodagem por parte de um veículo pode levar à redução da velocidade e consequentemente a um acréscimo da densidade do trânsito a montante). A amplitude da perturbação é a diferença entre o valor medido para a variável de tráfego antes e após a oscilação no trânsito nesse local.

Plano de padrões de congestionamento: Diagrama formado pela relação entre o fluxo a montante da via de acesso (q_{on}) e o fluxo a montante do nó na via principal (q_{in}). Nesse plano podem ser identificados diferentes tipos de SP ou GP.

Probabilidade de uma transição de fases: Valor dado para um intervalo de tempo de observação do trânsito T_{ob} e para um dado troço da via. A densidade probabilística para uma transição atinge um máximo na vizinhança de um nó, local mais provável onde sucederá a mudança de fases.

Teoria das 3 Fases: Explicação dos fenómenos complexos e não-lineares que sucedem no trânsito suportada pelos estudos empíricos e no princípio de que o tráfego rodoviário pode ser descrito como um fluxo de veículos que pode passar por três fases distintas (Fluxo Livre, Fluxo Sincronizado e Fila Móvel Longa).

Transição local: Passagem de uma fase a outra numa zona específica da via. A transição de fases pode ser espontânea ou induzida. A primeira tem origem numa perturbação interna (determinística ou aleatória) do fluxo rodoviário. A segunda tem que ver com a ocorrência de uma perturbação externa durante um curto intervalo de tempo e é geralmente provocada pela propagação de padrões de congestionamento por vários nós da via.

Transição local de 1ª ordem: Mudança de fase que surge a partir de um meta-estado. Associada a uma variação abrupta do valor das variáveis de tráfego. A transição de 1ª ordem diz-se espontânea quando há um efeito de núcleo.

Tempo de atraso de uma transição: Intervalo de tempo que medeia entre o momento em que o valor da variável de tráfego se encontra no intervalo crítico e a altura em que se dá a mudança de fases. O tempo de atraso da transição é uma grandeza complexa, constatando-se que para diferentes observações e os mesmos valores das variáveis de tráfego e parâmetros de controlo se obtém diferentes tempos de atraso.

Valor crítico: Valor de uma variável de tráfego (ex: fluxo ou densidade) para o qual a probabilidade de uma transição de fases é igual a 1.

Valor de threshold: É o valor limiar de uma variável de tráfego para a qual só é possível existir uma transição de fases caso aconteça uma perturbação local cuja amplitude exceda o valor crítico da variável. Este valor varia consoante a fase em que o sistema se encontre. A amplitude crítica de uma perturbação é máxima para o valor de *threshold* e nula quando a amplitude da perturbação iguala o valor crítico (máximo) da variável de tráfego.

Variável de tráfego: Característica do trânsito que varia no tempo e no espaço mesmo quando os parâmetros de controlo se mantêm uniformes e são independentes do tempo. O fluxo (q), a densidade (ρ), a velocidade (v), a distância entre veículos (g) são exemplos de variáveis do tráfego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kerner, B. S. (2004). The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications and Theory. Springer-Verlag, New York.
- [2] Marques, M. C. (2005). Metodologias de Simulação de Controlo de Sistemas Distribuidos para Gestão do Tráfego Rodoviário. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Fac. Ciências e Tecnologia, Lisboa, Portugal.
- [3] Marques, M. C., Silva, R. N. (2004). Road Traffic Simulation for Control Methods Development Control 2004, Faro, Portugal.
- [4] Marques, M. C., Silva, R. N. (2005). Traffic Simulation for Intelligent Transportation Systems Development. IEEE Intelligent Transport-Systems Conference, Viena, Austria.
- [5] Transportation Research Board (1994). Highway Capacity Manual, Special Report, 209, pp. 8-5.
- [6] Mannering, F. and W. Kilareski (1990). Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis. J. Wiley. New York.
- [7] Gazis, D. C. (1974). Traffic Science. John Wiley & Sons. New York.
- [8] Leutzbach, W. (1988). Introduction to the Theory of Traffic Flow. Springer, Berlin.
- [9] May, A. D. (1990). Traffic Flow Fundamentals. Prentice-Hall, New Jersey.
- [10] Daganzo, C. F. (1997). Fundamentals of Transportation and Traffic Operations, Elsevier Science, New York.

- [11] Kerner, B. S., Klenov, S. L. Comparison of Congested Pattern Features at Different Freeway Bottlenecks.

- [12] Treiber, M., Helbing, D. (2002). Reconstruction Spatio-Temporal Traffic Dynamics from Stationary Detector Data. Cooperative Transportation Dynamics, 1, 3.1-3.24.

- [13] Greenshield, B. D. (1935). A Study of Traffic Capacity, Highway Research Board Proceedings, Vol. 14. 448-477.

- [14] Helbing, D. (1997), Traffic Dynamics: New Physical Modelling Concepts. Springer-Verlag, Berlin.

- [15] Helbing, D. et al., eds. (2000). Traffic and Granular Flow '99: Social, Traffic and Granular Dynamics. Springer-Verlag, Berlin.

- [16] Neubert, L. et al. (1999). Single-vehicle Data of Highway Traffic: A Statistical Analysis. Physical Review E, Koln, Germany.

- [17] Maerivoet, S., Moor, B. (2005). Traffic Flow Theory, Technical Report. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, Belgium.

- [18] Hall, F. L. Traffic Stream Characteristics. McMasters University, Ontario, Canada.

- [19] Treiber, M., Hennecke A., Helbing, D. (2000). Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. Physical Review E, Vol. 62, 2.

- [20] Wang, Y., Papageorgiou, M. (2006). RENAISSANCE: A Real-Time Freeway Network Traffic Surveillance Tool, Proc. of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Toronto, Canada.

- [21] Helbing, D. (1997). *Traffic Dynamics: New Physical Modeling Concepts*. Springer.
- [22] Helbing, D. (2008). *Managing Complexity: Insights, Concepts, Applications*. Springer.
- [23] Treiber, M., Kesting, A., Helbing, D. (2006). Understanding widely scattered traffic flows, the capacity drop, platoons, and times-to-collision as effects of variance-driven time gaps, *Phys. Rev. E* 74.
- [24] Treiber, M., Kesting, A., Helbing, D. (2007). Influence of reaction times and anticipation on stability of vehicular traffic flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1999/2007, pp. 23-29.
- [25] Nishinari, K., Treiber, M., Helbing, D. (2003). Interpreting the Wide Scattering of Synchronized Traffic Data by Time Gap Statistics, *Phys. Rev. E* 68.
- [26] Fukui M. et al, eds. (2003). *Traffic and Granular Flow '01*. Springer, Heidelberg.
- [27] Hoogendoorn, S. P. et al, eds. (2004). *Traffic and Granular Flow '03*. Springer, Heidelberg.
- [28] Persaud, B. N. (1986). Study of a Freeway Bottleneck to Explore Some Unresolved Traffic Flow Issues. Ph. D. Dissertation, University of Toronto, Toronto, Canada.
- [29] Treiterer, J., Myers, J. A. (1974). The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow *Proc. of 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. D. J. Buckley (Editor), London, pp. 13-38.
- [30] Kühne, R. D. (1984). A Macroscopic Freeway Model for Dense Traffic: Stop-Start Waves and Incident Detection, *Proc. of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. J. Volmer (Editor), Scientific Press, Utrecht, Netherlands.

[31] Persaud, B. N., Hurdle, V. F. (1991). Freeway Capacity: Definition and Measurement Issues, Proc. of International Symposium on Highway Capacity. Karlsruhe, Germany.

[32] Haken, H. (1977). Synergetics. Springer, Berlin.

[33] Nicolic, G., Prigogine, I. (1977). Self Organization in Nonequilibrium Systems. Wiley, New York.

[34] Papageorgiou, M., Papamichail, I. (2008). Traffic-Responsive Linked Ramp-Metering Control, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, 1.

[35] Torres, J. M. (2005). Programação em Visual Basic. Universidade Fernando Pessoa, Porto.

ANEXOS

1 **Imagens da aplicação Java desenvolvida para extracção e processamento dos dados**
(aplicação desenvolvida pelo autor)

The screenshot shows a Java application window titled "Traffic Application". It contains several input fields and a set of radio buttons for video rate. The fields are: "Camera:" with a text box, "Date:" with a text box and the label "DD-MM-YY", "Time:" with a text box and the label "HH:mm:ss.SSS", and "Lane:" with a text box. There is also an "Elapsed Time:" label and a text box. To the right of these fields is a "Video rate:" section with seven radio buttons labeled "x1", "x2", "x4", "x6", "/2", "/4", and "/6". The "x1" radio button is selected. At the bottom of the window are three buttons: "Start", "Pause", and "Stop".

The screenshot shows a file selection dialog window. It has two text input fields: "Target File:" and "Output File:". To the right of the "Target File:" field is a "Browse..." button. At the bottom of the window are two buttons: "OK" and "Cancel".